



TITLE:

交通混雑の理論と政策 : 時間・都市  
空間・ネットワーク(  
Dissertation\_全文)

AUTHOR(S):

文, 世一

---

CITATION:

文, 世一. 交通混雑の理論と政策 : 時間・都市空間・ネットワーク. 京都大学, 2006, 博士(経済学)

ISSUE DATE:

2006-01-23

URL:

<https://doi.org/10.14989/doctor.r11769>

RIGHT:

# 學位申請論文

文 世一

# 交通混雑の理論と政策

時間・都市空間・ネットワーク

文 世一

交通混雑は、先進国であれ開発途上国であれ、世界中のあらゆる都市で人々を悩ませている。都市では集積の経済を求めてさまざまな経済活動が互いに近接して立地し、そのような集中によって実現する高い生産性は社会全体に便益をもたらすものである。ところが人や企業が近接して立地するのは、それらの間で頻繁に交通を行う必要のためであり、政策的対応がない場合は交通混雑を避けることができない。交通混雑は都市集積の利益を得るために社会が支払うコストといえるが、解決が不可能というわけではない。

厚生経済学の始祖 Pigou は、すでに 1920 年代から、混雑を外部不経済としてとらえ、それを内部化するための手段として混雑料金を提案した。その後 1960 年代に Vickrey や Walters らによって現代的な定式化がなされて以来、多くの研究が行われてきた。しかしつい最近まで、混雑料金の理論は経済学者による机上の空論と見なされ、現実的な混雑対策として政策担当者に受け入れられなかった。

その一つの原因は、混雑料金に関するこれまでの経済分析が、単一の交通施設（たとえば一本の道路）を対象とした静学分析を中心としてきたので、現実問題の要求する分析水準とは大きなギャップがあったことを指摘できる。交通混雑の状況は時と場所により大きく変化する。したがって料金も「いつ」「どこで」「いくら」にすべきかを決めねばならない。ところが異なる時刻あるいは異なる場所の混雑状態が互いに無関係ではなく、密接に影響を及ぼし合うことが一般的である。たとえばある道路において混雑料金をかけると、他の道路に交通量が転換するので、他の道路の混雑を悪化させる可能性がある。このような問題を取り扱うためには、交通混雑の経済分析に「時間」と「空間」を導入する必要がある。

経済分析の現状に比べて、現実世界は一歩先を進んでいる。シンガポールでは 1975 年からエリア・ライセンス・スキームという制度を導入し、混雑する時間帯に都心部に流入する車両に対して一定額の料金を徴収するようになった。このような料金制度を導入することによって、交通パターンが変化し混雑緩和に大きな効果があることが示された。その後情報技術の進歩にしたがって電子



的に自動課金するシステムが開発され、同様のシステムはノルウェーの3都市などでも適用されるようになった。米国では高速道路の料金を混雑状況に応じて動的に変動させるシステムも導入されている。そして2003年には、大都市ロンドンにおいて混雑課金システムがスタートした。このシステムは「世紀の実験」とも言われたが、現在までのところ経過は順調と報告されている。

上記のような実践は混雑料金やロードプライシングがもはや机上の空論でなく現実的な政策代替案であることを立証した。その事例はまだ数えるほどであるが、新たな導入に関する検討が世界中で進められており、今後も導入は増えることが予想される。現行の料金システムは必ずしも経済理論にもとづいた検討を通じて制度が設計されたものではないので、それが資源配分上正しいものであるかどうか評価が必要である。また今後導入する地域においてシステムを設計する指針を提供するためにも経済分析の役割は大きい。

本書は「いつ」「どこで」という問題に応えるため、交通混雑に関する既存の経済理論を時間および空間の次元に拡張し、より現実的な政策分析をめざしたものである。その内容は筆者が1990年代から続けてきた研究がその中心になっている。これらの研究成果は、*Journal of Urban Economics*, *Journal of Transport Economics and Policy*, *Transportation Research A* および *B*, *Review of Network Economics*、土木学会論文集などの学術誌に発表されたが、本書にまとめるに際してかなりの部分が再構成され、説明を補充している。時間と空間を考慮した交通混雑の経済分析は、近年になって世界中で新たな研究成果が生まれているが、本書はそのような研究潮流を体系的に紹介することもねらっている。

本書は三部から成る。本論に先立って第1章では経済学における交通混雑の標準的理論を解説するとともに、本書の主題である時間と空間の分析に関する先行研究を概観する。この章は交通混雑の理論を数回の講義で紹介する場合の教材として利用可能である。第I部は時間を考慮した動的分析である。第2章では、都市における最も深刻な問題である交通渋滞の基礎理論を展開する。交通渋滞は動的現象であり、伝統的な静学理論の枠組みでは取り扱うことができない。この章では交通渋滞の資源配分上の問題として動学的外部効果を明らかにし、その性質について論じている。第3章は朝のラッシュアワーにおける交通渋滞を解決するため、時間ごとに変動するピークロード料金を導出し、その

効果を評価している。第4章は、通勤ラッシュアワーにおけるピークロード料金が実施できない場合の次善の政策としてフレックスタイム制の効果を分析し、フレックスタイム導入を促進させるための公的介入のあり方を論じている。第II部は都市空間を考慮した次善の料金政策に関する研究である。具体的にはシンガポールやロンドンで実施されている現実的な方式である、コードン料金システムの設計に関する経済学的分析を提示している。第III部では空間を取り扱うためのもう一つのアプローチとして、ネットワークにおける交通量配分に着目する。第7章は混雑料金が複数の道路への交通量配分に及ぼす効果を分析し、一部の道路でのみ料金を徴収する際の料金設定指針を導き出す。第8章は近年進歩が著しい交通情報システムに着目し、情報提供が交通混雑に及ぼす影響、さらには情報提供と混雑料金を組み合わせた場合の効果を分析している。第9章は、都市空間に関する研究の総括として、大阪都市圏のネットワークを対象としたケーススタディを行っている。

筆者と交通混雑研究の出会い、立命館大学理工学部の巻上安爾教授のもとで修士論文を書いた、約20年前にさかのぼる。巻上研究室では、空と陸上そして路上走行を通じて交通渋滞の実態を調べる大規模な調査に参加する機会に恵まれ、交通現象について理論と実証の両面にわたって理解を深めることができた。博士課程では、京都大学工学部の吉川和広教授のもとで都市モデルに関する研究に取り組んだが、筆者の人生において最も苦しんだ時期でもあった。毎月の研究経過を吉川教授の前で報告するゼミに備えて、何度徹夜したのか数え切れない。厳しい一方で、なかなか成果が出ない間も気長に見守ってくださり、また研究者になることを勧めてくださったのも吉川教授であった。当時吉川研究室の助手であった小林潔司教授（現在は京都大学教授）は、海外から最先端の研究を紹介してくださるとともに、共同研究を通じて実に長時間議論していただいた。現在の専門である都市経済学と出会ったのも小林教授を通じてであった。この大学院の時期をともに過ごした奥村誠氏（現在広島大学助教授）、多々納裕一氏（現在京都大学教授）らと多くのことを語り合ったことは忘れられない。

東北大学助手に就職してからは、佐々木公明教授（当時助教授）のもとで、

まさに経済学部一年生の状態から本格的に経済学の勉強を始めた。数年間続いた週一回のマンツーマンの勉強会では、経済学者の研究作法を学べただけでなく、いくつかの共同論文も生まれた。東北大学で開催された地域科学ワークショップには、安藤朝夫教授、森杉壽芳教授をはじめ同じ専門分野の優れた同僚たちが集い、毎回徹底的に議論する雰囲気満ちていた。本書のもとになった論文の多くもこのワークショップで報告された。また東北大学では針山孝彦氏をはじめ他分野の研究者と交流する機会にも恵まれた。

現在勤務する京都大学では藤田昌久教授、森知也助教授とともに都市経済学ワークショップや科学研究費のプロジェクト、あるいは昼食などの日常的な交流を通じて、絶えず学問的刺激を受け続けている。藤田教授には本書の出版に際しても仲介の労を賜った。

本書の第4章は米川誠、第5章と第6章は吉川和広、小西孝治、第8章は小林潔司、安野貴人、第9章は秋山孝正、奥嶋政嗣の各氏との共同研究である。

本書の各章のもとになった論文に対しては、赤松隆、金本良嗣、川嶋辰彦、桑原雅夫、田淵隆俊、八田達夫、松澤俊雄、山田浩之、Richard Arnott, Robin Lindsey, Jan Rouwendal, Ken Small, Erik Verhoef, Hai Yangをはじめ、学会や研究会の参加者諸氏から有益なコメントをいただいた。

本書に含まれる研究に対して、文部科学省の科学研究費補助金（1993年度、2001-2003年度、2005年度-）、京都大学21世紀COEプログラム「先端経済分析のインターフェイス拠点の形成」から資金援助を受けた。また本書の出版に際しては京都大学経済学会からの出版助成を受けた。東洋経済新報社の小川正昭氏には出版の過程でお世話になった。京都大学大学院の安起正君、寺地祐介君、学部生の木村元君には原稿の整理や図表作成などの雑事を手伝っていただいた。

以上のすべての方々のご支援のおかげで本書の出版が可能になったことを、ここに記して感謝の意を表したい。

本書は単著による初の出版になるので、私事について書くことをお許しいただきたい。大学院に進みさらに研究者をめざすことなど、当時の私にとっては途方もない冒険といえた。にもかかわらず、息子の選択を常に尊重してくれ支援を惜しまなかった、父 鍾天と母 貞鉉、そして学生時代から苦楽をともに

しながら様々な形で研究に取り組む原動力を与え続けてくれた、妻 美穂に本書を捧げたい。

2005 年 10 月 京都にて

文 世一

# 「交通混雑の理論と政策」

## 目 次

第1章 序 論	1
1-1 問題の所在	1
1-2 交通混雑の基本モデル	3
1-3 混雑の経済理論の展開	9
1-4 時間、都市空間、ネットワーク	23
第I部 時間を考慮した動学分析	34
第2章 交通渋滞と動的的外部効果	35
2-1 はじめに	35
2-2 交通流理論	36
2-3 交通渋滞の動的モデルとトリップ費用	40
2-4 均衡および最適道路利用	45
2-5 おわりに	48
付論 2-A 「超混雑」の議論に関する考察	49
付論 2-B 交通流理論の補足	54
付論 2-C 最適な道路利用の条件	55
第3章 出勤ラッシュアワーにおける均衡と最適	57
3-1 はじめに	57
3-2 通勤ラッシュアワーにおける均衡と最適	58
3-3 交通混雑のモデルとピークロード料金	60
3-4 交通渋滞の動的モデルによる分析	71
3-5 均衡解及び最適解のシミュレーション分析	74
3-6 おわりに	78
付論: 最適な道路利用の条件	79
第4章 交通需要マネジメント ― フレックスタイム	83
4-1 はじめに	83
4-2 モデル	86
4-3 交通混雑と通勤者の出発時刻選択	87
4-4 フレックスタイムが生産性に与える影響	97
4-5 均衡におけるフレックスタイムの採用状況	99
4-6 おわりに	110
付論A: 時刻ごとのグループ別労働者数	111
付論B: 式(4-27)の導出	112
付論C: 式(4-28)の導出	113
第II部 都市空間	115
第5章 最適なコードンプライシング	116

5-1	はじめに	116
5-2	モデル	118
5-3	コードンプライシングのもとでの均衡	121
5-4	最適なコードンプライシング	126
5-5	経済厚生の評価	132
5-6	おわりに	136
付論	シミュレーションのためのパラメータ設定	137
第6章	非単一中心都市への拡張	139
6-1	はじめに	139
6-2	モデル	139
6-3	非単一中心都市における最適なコードンプライシング	141
6-4	シミュレーション	142
6-5	おわりに	154
付論	効用最大化と需要関数	154
第III部	ネットワーク	156
第7章	交通量配分と次善の混雑料金	157
7-1	はじめに	157
7-2	モデル	158
7-3	交通量配分方式の比較	164
7-4	ドライバーの異質性を考慮したモデル	166
7-5	ドライバーの異質性と料金政策の効果	169
7-6	おわりに	172
第8章	経路情報システムと混雑料金	173
8-1	はじめに	173
8-2	従来の研究	174
8-3	モデル	175
8-4	最適な交通量配分と混雑料金	177
8-5	情報・料金システムの厚生効果	180
8-6	シミュレーション	181
8-7	おわりに	184
付論	厚生水準の比較	186
第9章	大阪都市圏におけるケーススタディ	188
9-1	はじめに	188
9-2	モデル	190
9-3	次善の料金政策	192
9-4	大阪都市圏における実証分析	194
9-5	おわりに	207
参考文献		

## 第1章 序 論 — 交通混雑の経済分析

### 1-1 問題の所在

エンジンの発明と土木工学の結合により成立した自動車交通システムは、人や物の空間的移動に大きな自由をもたらした。好きなときに好きなところへ、戸口から戸口まで移動できることは自動車の最大の魅力である。しかし今日、アクセルさえ踏めば容易に時速100km以上で走れる自動車を実際に都市内を移動する速度は、自動車の発明される前の馬車時代とあまり変わらないともいわれている（Wright (1992)）。

混雑に巻き込まれた人々は、そうでなければ有益に使えたはずの貴重な時間を浪費させられるばかりでなく、欲求不満、怒り、ストレスにより肉体的、精神的にもダメージを受けている。また混雑による速度低下は燃料効率の低下と大気汚染を通じて、資源の浪費と地球環境の悪化を加速している。

日本では2002年度における渋滞損失時間が全国で38.1億人・時間、一人당りに換算すると一年当たり30時間に達すると報告されている<sup>1</sup>。時間価値が2000円/時とすれば、その額は全国で7兆6200億円、一人당り6万円になる<sup>2</sup>。米国の85大都市圏では2002年に混雑により浪費された時間は一人당り46時間(人口300万人以上の大都市圏では62時間)になるが、その数値は1982年の16時間に比べると3倍に増加している<sup>3</sup>。なおこれらの数字は、速度低下による旅行時間の増大のみを表しており、上に書いたような他の費用は含まれていない。以上は限られた例であるが、世界中で数億人の人々が混雑の影響を毎日のように繰り返し受けている点も重視すべきである。

---

<sup>1</sup> 国土交通省では、渋滞している現況と、仮にそのような渋滞がない場合の走行時間をそれぞれ求め、二者の差を集計して「渋滞損失時間」という指標値を計算して公表している。詳しくは <http://www.mlit.go.jp/road/ir/data/jutai/index-d.html> を参照されたい。

<sup>2</sup> 時間価値とは、個人が交通に要する時間を1時間節約するために支払ってもよいと考える金額である。国土交通省は就業者の1時間当たり平均賃金を用いているが、交通行動にもとづく計量分析によれば賃金の1/2から2/3だといわれている。ここでは日本で行われた実証研究（日本交通政策研究会(1988)）の結果を参考にして2000円/時としている。

<sup>3</sup> David Schrank and Tim Lomax, 2004 URBAN MOBILITY REPORT による推計値。なお <http://mobility.tamu.edu> からダウンロードできる。

混雑を緩和するために政府は巨額の投資によって道路の整備を進めたが、その割に混雑の緩和は遅々として進まなかった。道路を整備すると、確かに一時的に交通条件が改善されるものの、それを知ると、改善前は自動車を利用していなかった人々も新たに自動車を利用するようになるので、整備による効果を相殺してしまうのである。その一方で、公共交通の利用者数は減少し、その経営を圧迫している。多くの交通企業は、利用者が減少すると、運行頻度の減少と運賃の値上げを行い、それがさらなる利用者減少を招くという悪循環に陥っている。公共交通サービスの低下は、効率性の観点から問題であるばかりでなく、自動車を持たず公共交通に依存する人々の生活により深刻な影響を及ぼす。自動車を持たない人々は所得が低い場合が多いので、所得分配上も問題である。

交通混雑はきわめて複雑な現象であり、上記のように政策の意図と反する結果をもたらすことがしばしば起きる。交通混雑の問題に限らず、あらゆる政策分析においては、問題となる現象のメカニズムを解明することが第一歩である。さまざまな政策手段がどのように効果を及ぼしてゆくかを正しく評価することによって、はじめて有効な政策手段を見いだすことができる。

道路混雑の場合、まずは道路上の車両の動きを支配する物理的法則を知る必要がある。道路の幅や勾配、曲線の形状と、個々の車両の加減速性能、そして前後左右を走る車両間の相互作用の結果として、混雑の状態が決定される。道路上の交通流に関する理論や実証分析は、主として交通工学の分野で研究されてきた。そしてこれらの知見は道路の設計に用いられたり、円滑な交通流を達成するため街路網における信号制御や高速道路における流入制限などの施策の検討に応用されてきた。

一方、個々の車両は人間が運転するものであることを忘れてはならない。観察される交通現象の背後には、各個人の意思決定が決定的な役割を果たしている。有効な混雑対策とは、このような個人の意思決定のもとになるインセンティブに働きかけるものでなければならない。交通混雑の問題に対しては、自然科学と社会科学の知見を動員した学際的アプローチが不可欠といえる。

交通混雑は、交通に関して個人が行うあらゆる選択が関係している。すなわち交通を行うかどうか、どこからどこに行くか、いつ出かけるか、どのような



交通手段（車かバスか電車か徒歩か）、どの経路を通るか、等々。ある道路におけるある時刻の交通混雑の状況は、無数の個人による、上記のような多次元の選択行動が集計された結果として実現する。その結果として交通混雑の状況は時と場所により大きく変化する。

本書では、「時間」と「空間」という二つの側面に着目して交通混雑の問題にアプローチする。道路はいつでもどこでも混んでるわけではない。交通量の空間的分布や時間的変動を制御することが混雑による経済損失を減少させる上で有効である。従来の混雑対策は、道路の建設や交通流の規制による制御などのような工学的手法が中心であった。本書では混雑料金をはじめとする経済学的手段が、交通混雑の時間的および空間的変動に及ぼす効果を分析することを主たる目的としている。

1990年代以降、交通工学と経済学の融合が進展した。交通工学の論文で経済学の専門用語が多用されるようになり、混雑料金を取り扱った論文が飛躍的に増加した。経済学のジャーナルでも交通流理論に基づいて交通混雑を分析した論文が掲載されるようになった。それに伴い時間と空間を明示的に考慮した交通混雑の経済学的研究が新たな段階で進められている。本書は基本的には経済学の研究書であるが、交通工学における研究成果を積極的に取り入れている。

本章は序論なので、まずは次の節で交通経済学における交通混雑の基本モデルについて説明しておく。これは Pigou (1920)以降、Walters (1961)、Vickrey (1963)、Mohring (1976)をはじめとする多くの研究者により彫琢をへてきた伝統的理論である。後の各章においても、ここで紹介する基本的概念を頻繁に引用することになる。

## 1-2 交通混雑の基本モデル

### 1-2-1 混雑する交通システムの均衡と最適

交通経済学における標準的な混雑の理論は、単一の交通施設（たとえば一本の道路）を対象とした静学分析である。交通混雑は、道路、鉄道、航空などあらゆる種類の交通手段について生じるが、経済全体について見ると自動車引き起こす道路混雑が最も広範かつ重大である。以下に述べる基本モデルも道路

混雑を想定しているが、混雑現象の定式化が抽象的なので、他の交通手段についても通用する。

二つの地点を結ぶ一本の道路を想定する。この道路は起点から終点まで均一であり、したがって交通容量も一定であると仮定される。交通容量とは一定時間に通過できる交通量の最大値のことである。たとえば道路であれば、車線の幅が広く、勾配が平坦で、カーブがなく直線に近いほど交通容量は大きい。この道路を使って二地点間を移動する（トリップと呼ぶ）ために要する費用には、燃料費、道路料金などの金銭的費用と、トリップ所要時間を金銭換算した時間費用が含まれる。金銭的費用と時間費用の和を「一般化交通費用」とも呼ぶ。交通混雑は、交通容量に比べて大きな交通量が流入することによる速度の低下が原因である。混雑による経済損失には、燃費の悪化による費用の増大や環境への悪影響が含まれるが、圧倒的に大きな割合を占めるのは所要時間の増大による損失である。個人がこの道路を使って一回トリップするのに要する費用（以下私的トリップ費用）は、交通量  $Q$  と交通容量  $W$  の関数であり、 $C(Q, W)$  ように表される。ここで  $C_Q > 0, C_W < 0$  が仮定される<sup>4</sup>。  $C_Q > 0$  は、交通容量一定のもとで交通量が増加するとトリップ費用が増加することを意味するが、これが交通混雑を表している。また  $C_W < 0$  は、交通量一定のもとで交通容量が増大すると混雑が緩和されトリップ費用が低下することを表している。

伝統的理論において、需要サイドは集計的需要関数によって簡単に表される。トリップ費用が上がると、人々はトリップを行う回数を減らしたり、他の交通手段を用いたりする。このような選択行動は、個人の効用最大化あるいは企業の利潤最大化行動から導くことができるが、いずれにしても注目する道路に対する交通需要はトリップ費用の減少関数となる。逆需要関数を  $P(Q)$  と表そう。逆需要関数の値はトリップの私的限界便益を表すと同時に社会的限界便益も表している。

各個人はトリップの私的限界便益が私的トリップ費用を上回る限りトリップを行う。したがって均衡が達成されるとき交通量は次の関係を満たすように

---

<sup>4</sup>  $C_Q, C_W$  は、それぞれ、 $C(Q, W)$  の  $Q, W$  に関する偏導関数、 $\frac{\partial C}{\partial Q}, \frac{\partial C}{\partial W}$  のことである。

決定される。

$$P(Q) = C(Q, W) \quad (1-1)$$

図 1-1 において、需要曲線とトリップ費用の交わる点に対応する横軸の値  $Q^e$  が均衡交通量である。

上のように決定される交通量は社会的に望ましい水準であろうか。この点について検討するために、社会的に最適な交通量を求める問題を次のように定式化する。

$$\text{Max}_Q \int_0^Q P(q) dq - C(Q, W)Q \quad (1-2)$$

上の目的関数は社会的余剰であり、第 1 項はトリップを行うことによる総便益、第 2 項は一人当たりのトリップ費用にトリップ数を乗じたものなので社会的総トリップ費用である。したがってここでは資源配分の効率性という観点から最適性を論ずることになる。

トリップ数  $Q$  に関する最適条件より次の式が得られる。

$$P(Q) = C(Q, W) + C_Q Q \quad (1-3)$$

上の式の右辺は、交通量がわずかに増加したときの社会的総トリップ費用の増分なので、社会的限界費用と解釈することができる。したがって上の条件式は、社会的限界便益と社会的限界費用とが等しくなるように交通量が決まるとき、社会的に効率的な道路利用が実現する、ということを述べている。各個人の自由な選択により実現する均衡の条件である(1-1)式と比べてみると、(1-3)式には右辺第 2 項が加わっている。この項は、交通量がわずかに増加したときの個人のトリップ費用の増加  $C_Q$  に交通量 (=道路利用者数)  $Q$  を乗じたものである。一台の交通量増加は、他の道路利用者のトリップ費用を少しだけ増加させるが、それをすべての利用者について集計したものが  $C_Q Q$  である。これは混雑の外部効果と呼ばれているが、個人が道路利用を選択することによって混雑の加害者となることを意味している。



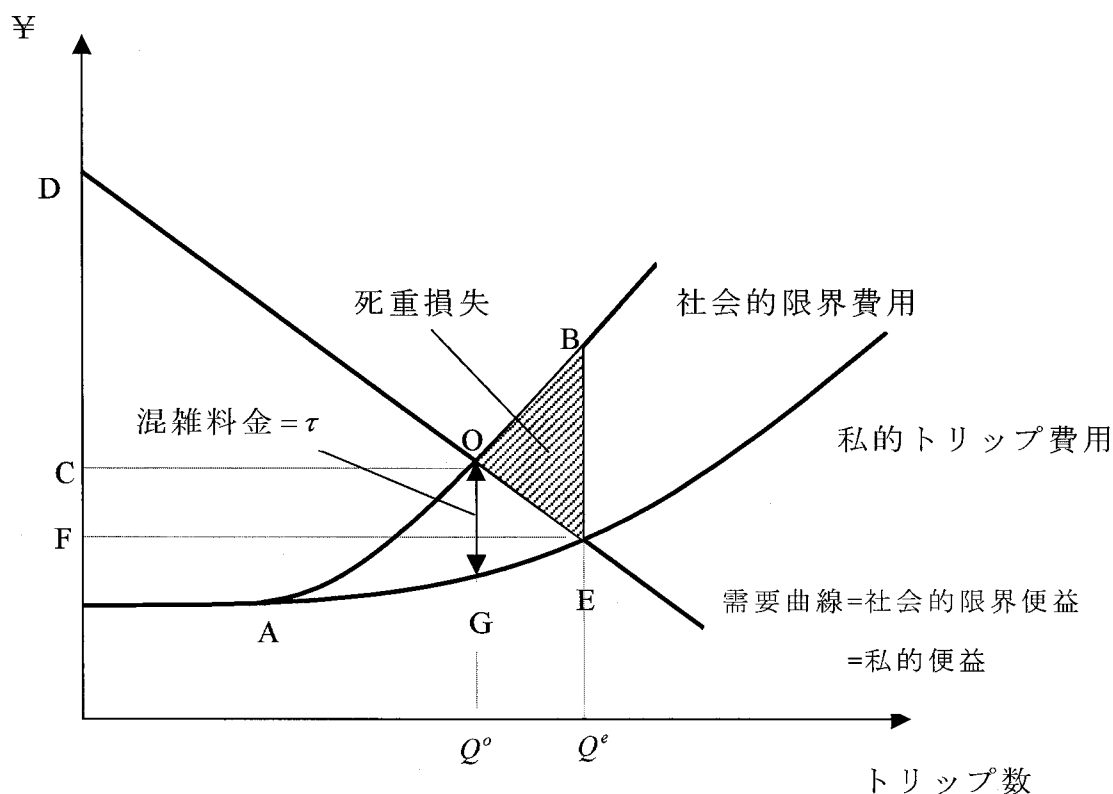


図 1-1 混雑する交通システムの均衡と最適

$C_q > 0$ の仮定により、社会的限界費用は私的トリップ費用よりも大きな値を持ち、両者の差は交通量とともに拡大するので、図 1-1 のように描かれる。図より明らかなように、社会的に効率的なトリップ数  $Q^o$  は、 $Q^e$  よりも小さい。すなわち個人が自由にトリップの意思決定を行う場合、交通量は過大となり、混雑による経済損失が生じる。

混雑の経済損失とは、過大な交通量  $Q^e$  のために、社会的に効率的な交通量  $Q^o$  の場合よりも低い水準の社会的余剰しか達成できないことである。したがって、下のように、交通量が  $Q^e$  のときと  $Q^o$  のときの社会的余剰の差として混雑の経済損失が計算される。

$$\left[ \int_0^{Q^o} P(q) dq - C(Q^o, W) Q^o \right] - \left[ \int_0^{Q^e} P(q) dq - C(Q^e, W) Q^e \right]$$

部分積分を適用すると、上式は下のように書き換えられる。

$$\int_{Q^0}^{Q^*} (C(q, W) + C_q q - P(q)) dq \quad (1-4)$$

(1-4)式の被積分関数内の第1項と第2項の和は社会的限界費用関数、第3項は需要関数なので、経済損失の値は図1-1において点OBEで囲まれた（影をつけている）部分の面積に等しく、これは死重損失（dead weight loss）と呼ばれる<sup>5</sup>。

### 1-2-2 混雑料金

各個人は、利用しようとする道路の混雑状況を考慮してトリップを行うべきかどうかを選ぶが、そのとき他の利用者に与える効果を考慮しないので、私的トリップ費用と社会的限界費用が乖離する。このとき各個人の選ぶトリップ数は過大となり、これが混雑による損失の原因である。社会的に効率的な道路利用を分権的に達成するための手段として、経済学者は混雑料金の徴収を提案してきた。混雑料金は、図1-1における社会的限界費用曲線と私的トリップ費用曲線の差に等しい。このような料金制のもとで、道路利用者の被る費用は社会的限界費用に等しくなるので、私的動機に基づく均衡解として、効率的な交通量 $Q^0$ が実現するのである。このとき最適な混雑料金は図における点OG間の距離（ $=\tau$ ）に等しい。このような料金政策を通じて社会的に効率的な資源配分を達成することを、一般に「外部効果の内部化」と呼ぶ。

混雑料金は、混雑の程度が激しい道路ほど高額になる。図1-2には、二通りの需要曲線のもとでの均衡解と最適解をそれぞれ示している。需要水準が高い場合（需要曲線d1に相当する）、低い場合（需要曲線d2）よりも大きな交通量に対応する点で、需要曲線がトリップ費用曲線と交わる（ $Q_1^e > Q_2^e$ ）。したがって、均衡におけるトリップ費用は、前者の方が高い（混雑が激しい）。一方、混雑料金を課した場合、図より、需要水準が高いほど、混雑料金の額が大きくなるこ  
とがわかる（ $\tau_1 > \tau_2$ ）。

<sup>5</sup> 本章の冒頭では、日本および米国において推計された混雑の経済損失額を紹介したが、それらの値はここで述べた経済学的な定義にもとづいて計算したものではない。

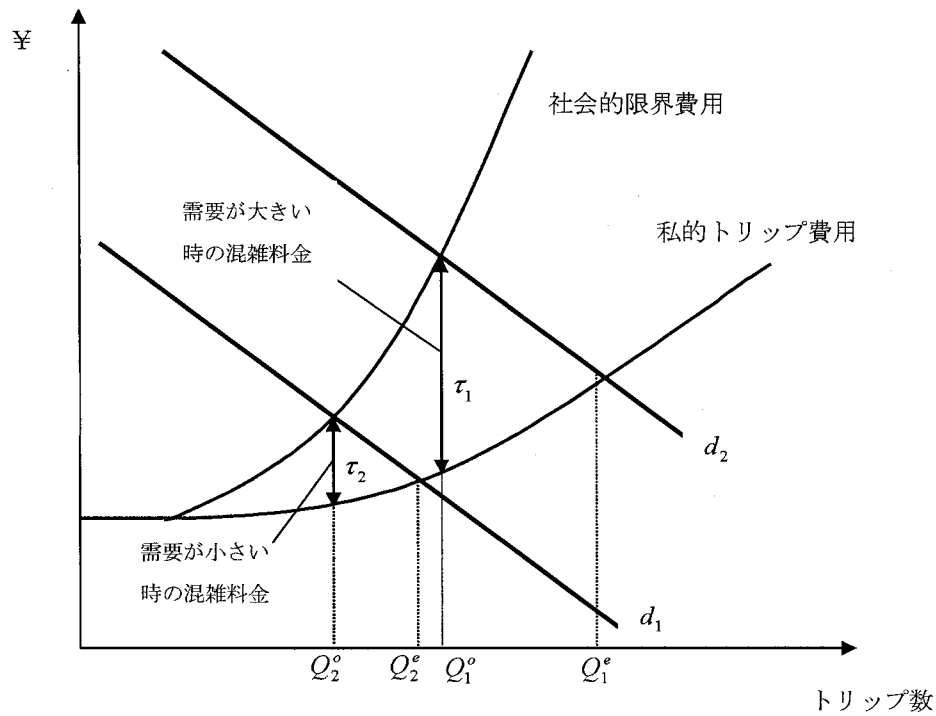


図 1-2 需要水準と混雑料金

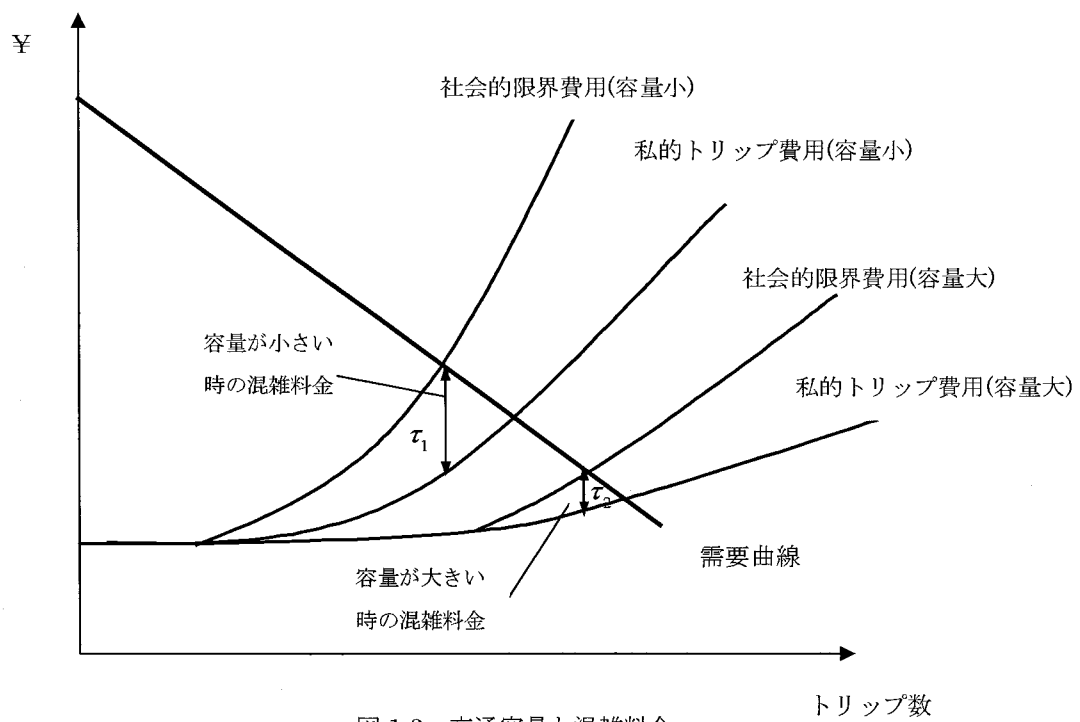


図 1-3 交通容量と混雑料金

図1-3には、二通りの交通容量に対する均衡解と最適解を示している。交通容量は道路の幅や線形（坂道やカーブのきつさ）に依存する。ここで交通容量の大小は、自由走行時（交通量がゼロのとき）の費用に影響を与えないものと仮定する。交通容量の小さい道路においては、小さな交通量の水準から混雑が生じ始める。したがって、道路に対する需要関数が同じであっても、容量の小さな道路においては、均衡におけるトリップ費用が高く、混雑料金も高くなることが図より読み取れる。以上より、需要水準が高い場合や道路の交通容量が小さい場合は、混雑の外部費用が大きくなるので、より高い混雑料金が課されるのである。

ただでさえ混雑してサービス水準が低いのに、高い料金を課されることに利用者は不満であろう。実際、その通りである。混雑料金の導入は社会全体の効率性を改善する一方、道路利用者の厚生を低下させる。混雑料金が導入されない状態（無料金均衡）において利用者の消費者余剰は、図1-1の点DEFで囲まれた領域の面積に等しい。ところが混雑料金が課されると消費者余剰は点DOCで囲まれた領域の面積になるので、それは課されないときの面積よりも小さい。利用者にとっては、混雑料金の導入によって交通混雑は減少するものの、金銭的負担が混雑緩和効果を上回るので、厚生が低下することになる。このことは、混雑料金の導入を阻む最大の原因である。

一方、社会的観点から見れば、混雑料金は消費者余剰の減少分を上回る料金収入を生むので、全体としては経済厚生を改善する。ただし以上の議論は短期における結果であることに注意されたい。長期においては、その料金収入を有効に用いることによって、利用者の厚生をも改善することができる。その内容については、後述する。

### 1-3 混雑の経済理論の展開

1960年代以降、交通混雑に関する研究は膨大な数になり、レビュー論文も多く出ている（Morrison (1986)、山内・竹内 (1992)、Small(1992)など）。本書の主題である「時間」と「空間」を明示的に取り扱った研究について、1990年代以



前のレビュー論文では、Small(1992)を例外として、ほとんど言及されていない。本節ではまず時間と空間を捨象した伝統的な枠組みのもとでの代表的なトピックに絞ることとし、交通容量の拡大、機関分担と公共交通の問題、そして所得分配の問題について紹介する<sup>6</sup>。時間と空間を導入した研究については次の節で述べることにする。

### 1-3-1 交通容量の拡大

混雑の問題に対してまず最初に思いつく対策は、道路線形を改良したり道路の拡幅により交通容量を拡大することである。このような手法は従来から実施されてきたが、必ずしも有効でないことはすでに多くの経験を通じて認識されている。

図 1-4 には、混雑料金が徴収されない状況での交通容量拡大の効果を図示している。たとえば交通容量が  $W$  から  $W'$  ( $W < W'$ ) のように大きくなると、トリップ費用曲線が右下の方へシフトするので、均衡点が  $B$  から  $A$  に変化する。このとき、トリップ費用が減少するが、交通量が  $Q$  から  $Q'$  に増加する。これは以前に他の道路や交通機関を使ってきた人が、新たにこの道路を利用するようになったからである。

---

<sup>6</sup> これらのトピックは、すでに従来の研究で多く論じられているものであり、時間と空

---

間の分析に焦点をあてる本書の第 2 章以下では取り扱わない。

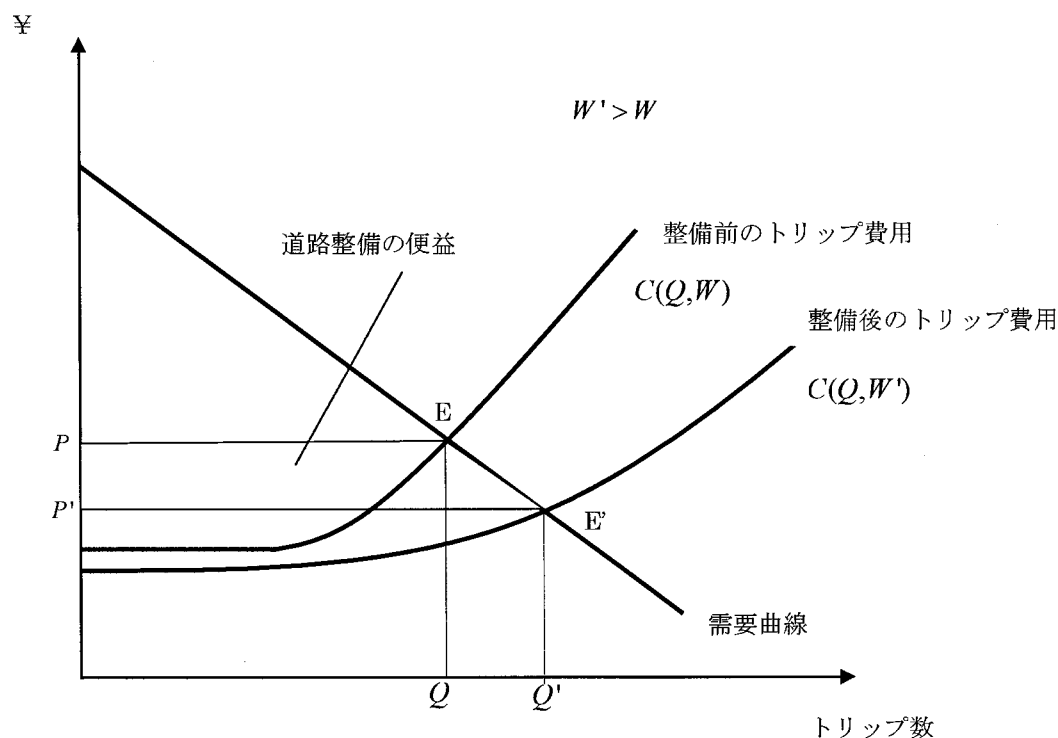


図 1-4 交通容量拡大の効果

交通容量の拡大は、ほとんどの場合、公共部門による計画に基づいて行われるが、その際、個々の計画案は整備することによる社会的便益が費用を上回る場合に限って正当化される。すなわち費用便益基準である。この点について詳しく見よう。

交通容量拡大による社会的便益は、整備した場合としない場合の社会的余剰の差として評価される。社会的余剰は  $\int_0^Q P(q) dq - C(Q, W)Q$  により求められるので、 $W$  から  $W'$  への変化による社会的便益は、図 1-4 における  $PBA P'$  で囲まれた面積に等しい。したがって費用便益基準を満たすためには、社会的余剰増加が道路整備費用を上回らねばならない。

トリップ需要の弾力性が高い場合、単なる道路整備は混雑緩和に有効でない。図 1-5 には、そのようなケースを示している。弾力性が高いとき、需要曲線は水平に近くなる。このとき、道路整備による効果は、交通量増加によってほとんど相殺されてしまう。このような場合、道路整備による対応は有効な混雑対

策とはいえない。

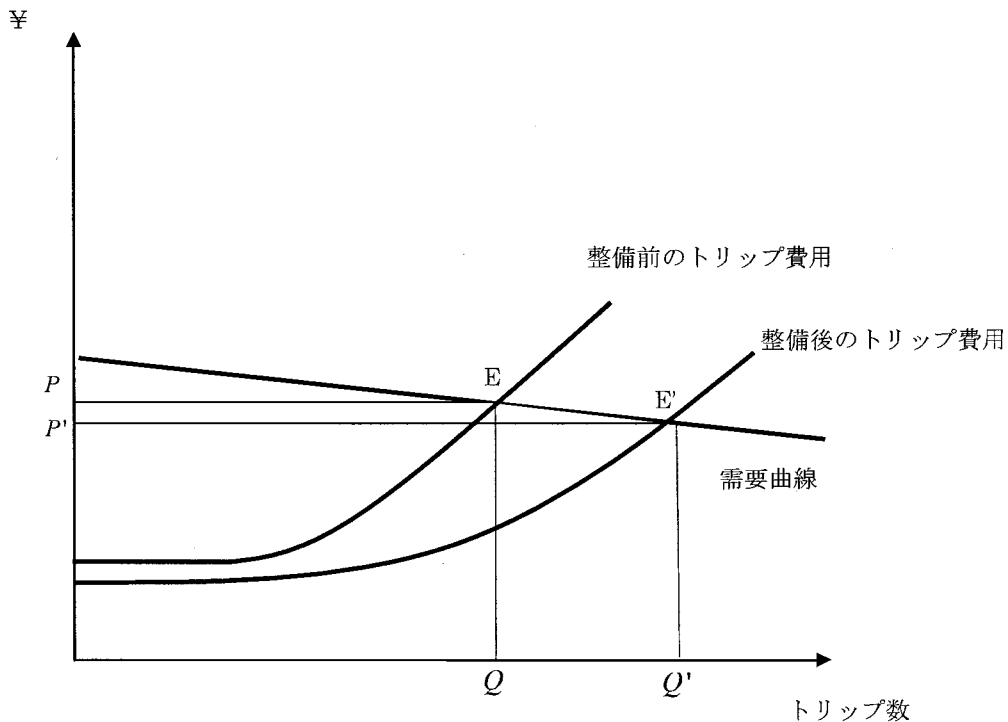


図 1-5 交通容量拡大が有効でないケース

実際に行われてきた道路整備が、費用便益基準に基づいて進められてきたとは必ずしも言えないが、厳密な費用便益基準に基づいて行なったとしても、それは社会的に効率的でない。なぜなら、図 1-4 や 1-5 に示したような変化は、非効率な均衡点から、また別の非効率な均衡点への移動に過ぎないからである。また混雑料金などの対策なしに、道路整備のみを行う場合、その財源として他の税金からの収入を用いる必要がある。一般にそのような税金は資源配分を歪める上、いずれ最終的には消費者が負担することになる。

一方、混雑料金を導入し、その料金収入を用いて道路整備を行うことは有効な対策である。トリップ数と交通容量の最適な組み合わせを求める問題を以下のように定式化する。

$$\text{Max}_{Q,W} \int_0^Q P(q) dq - C(Q,W)Q - \rho W \quad (1-5)$$

上の問題は、(1-2)式の目的関数に交通容量  $W$  を持つ交通施設を整備するために要する費用  $\rho W$  (たとえば道路建設費用) を考慮し、交通容量を計画変数とし

て加えたものである。なお  $\rho$  は正の定数であり、交通容量一単位の整備費用を表す。1-2-2 の分析が、交通容量が固定されたもとでのいわば短期の問題であったのに対し、ここでは長期の問題を取り扱っていることになる。

トリップ数に関する最適条件は式(1-3)と同様である。交通容量に関する最適条件は以下の通り。

$$-C_w Q - \rho = 0 \quad (1-6)$$

上式の左辺第1項は交通容量が増大したときの総トリップ費用の減少分であり、これは容量拡大による社会的便益の増加を表している。一方、第2項は交通容量を一単位増大させるために要する費用である。したがって上式左辺は、容量拡大による社会的純便益の変化を表している。そして(1-6)式は、社会的純便益が増加する限り道路容量を拡大すべしという、いわゆる費用便益基準と同じことを述べている<sup>7</sup>。すでに示したように、最適なトリップ数は混雑の外部効果に等しい混雑料金を課することにより達成できるが、このような混雑料金の収入と最適な容量を整備する費用との間には興味深い関係が成立する (Mohring(1976))。

ここでトリップ費用関数  $C(Q, W)$  がゼロ次同次であると仮定する。これは規模の経済が存在しないことを意味し、トリップ費用は  $C\left(\frac{Q}{W}, 1\right)$  のように、混雑率の関数で表される。すなわち交通容量とトリップ数を定数倍しても、トリップ費用は不変である。道路交通の場合、この仮定はほぼ満たされることが知られている。たとえば片側2車線道路が4車線に拡幅され、2車線のときの倍の交通量が流れたと想定しよう。このとき、拡幅される前後で走行速度がほぼ同じになるであろうことは直感的にも理解できるだろう。このとき、同次関数に関するオイラーの定理より次の式が成り立つ。

$$C_Q Q + C_W W = 0$$

上の式の両辺に  $Q$  を乗じ、容量に関する最適条件(1-6)を代入すると次の式が

---

<sup>7</sup> 最適な混雑料金の条件(1-3)は道路容量がどのように決められていても影響を受けないが、最適な容量を決定する条件は料金がどのように課されているかに依存する。すなわち料金が課されていないか、課されていても最適でない場合、(1-6)のような単純な費用便益基準にもとづいて道路整備を進めると、容量が過大になったり過小になったりする。この点については Wheaton(1978)を参照されたい。

得られる。

$$C_Q Q^2 - \rho W = 0 \quad (1-7)$$

一台あたり混雑料金は  $C_Q Q$  なので、左辺第一項は混雑料金の総収入であり、第二項は交通施設整備費用である。したがって最適な混雑料金を課したとき、その料金収入は最適な容量の施設整備費用をちょうどカバーする。

料金収入を用いて道路整備を行うと、混雑料金の導入によって個人の便益が減少するという、前節に述べた命題は修正される。すなわち混雑料金の収入を用いて道路整備を進めれば、混雑料金を導入しない場合に比べて、長期的には個人の便益も増加するのである。このことは料金が最適な水準でなくても成立する。いま道路料金が  $\tau$  に等しく、そこから得られる料金収入をすべて道路整備のために支出するものとしよう。このとき次の式が成立する。

$$\tau Q = \rho W \quad (1-8)$$

交通量  $Q$  は次の均衡条件式により決定される。

$$P(Q) = C(Q, W) + \tau \quad (1-9)$$

図 1-6 には、上のような政策によって利用者の厚生が増加するケースを描いている。当初は料金を徴収していないとすると、均衡は点 E で達成される。容量増加により走行費用曲線が下にシフトするが、それに料金が加わるので、新たな均衡は点 E' に移る。容量増加による費用の下方シフトが十分大きく、そのために要する料金水準が十分小さい場合には利用者の厚生が増加するのである。このことは道路容量への投資が効率的であることを意味する。以下この点について具体的に示そう。

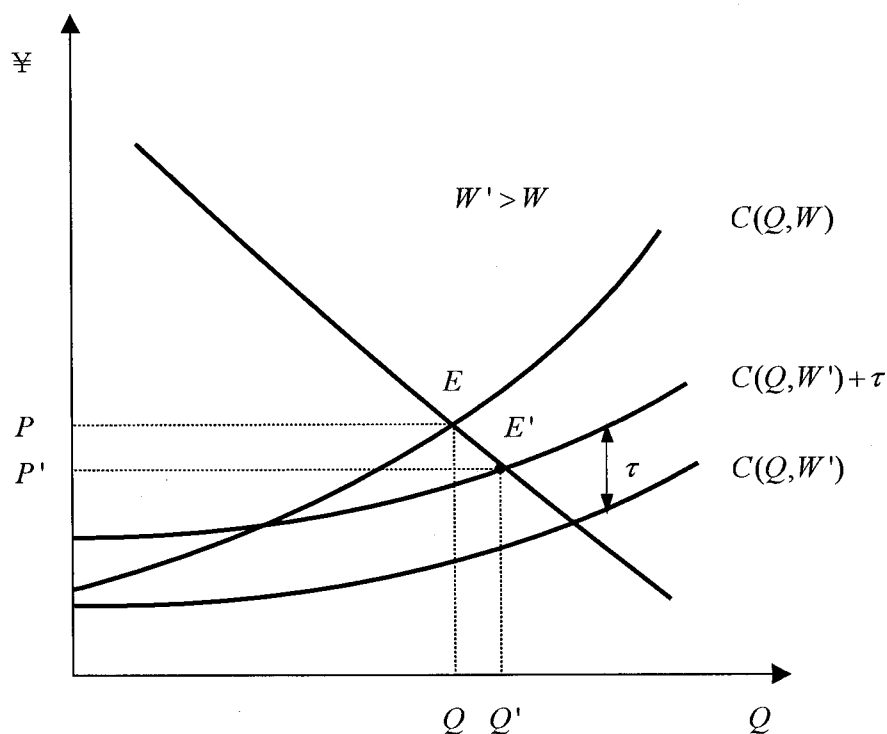


図 1-6 料金収入を用いた道路容量拡大の効果

(1-8)式を(1-9)式に代入して $\tau$ を消去した式の両辺を $W$ で微分すると次の式が得られる。

$$\frac{dQ}{dW} = -\frac{-C_W Q - \rho}{(P_Q Q - C_Q Q + \tau)} \quad (1-10)$$

上式右辺の分母はよほどのことがない限り負である<sup>8</sup>。したがって $\frac{dQ}{dW}$ の符号は分子によって決まる。分子は(1-6)式のところで述べたように、交通容量拡大による社会的純便益を表している。すなわち容量拡大が費用便益基準を満たす場合、分子の符号は正であり、 $\frac{dQ}{dW} > 0$ である。

図より明らかなように、利用者の厚生が増加することは、利用者の（料金込

<sup>8</sup> 分母の第1項は $P_Q < 0$ なので負である。第2項は混雑の外部効果なので、分母が正になるのは料金 $\tau$ が最適混雑料金よりも十分に大きい場合に限られる。實際上、このようなケースは想定し難い。

み)トリップ費用の低下を通じて均衡交通量が増加することと同義である<sup>9</sup>。したがって、道路利用に対し過度に高くない料金を徴収し、その料金収入を用いて実施される容量増加が費用便益基準を満たす場合、利用者の厚生は増加する。

### 1-3-2 交通手段選択と公共交通の問題

道路混雑の対策として、鉄道やバスなど公共交通の利用を促進する必要性がしばしば指摘される。そのような政策手段には地下鉄の新線建設、公共交通への補助を通じて運賃の割引や本数の増加のようなサービス改善を行うことなどが含まれる。

まずは公共交通と自動車という二つの交通手段が存在する状況での個人の交通手段選択と交通システムの均衡を記述するモデルを定式化しよう。

公共交通機関として鉄道を想定する<sup>10</sup>。経済には $N$ 人の個人がおり、各個人は自動車か鉄道のいずれかを用いて1日に必ず1回トリップを行うものとする。このとき各交通手段に対する需要は弾力的であるが、総トリップ需要は非弾力的である。この仮定は交通手段分担に焦点を絞るためのものであるが、通勤交通に関しては妥当する<sup>11</sup>。各個人は時間費用と金銭費用の和からなるトリップ費用の小さい交通手段を選択する。自動車および鉄道によるトリップ費用は、それぞれ以下のように書ける。

$$P_A = C_A(Q_A, W_A) + \tau_A$$

$$P_B = C_B + \tau_B$$

ここに $Q_A$ は自動車によるトリップ数、 $W_A$ は道路容量、 $\tau_A$ は道路料金である。 $C_A(Q_A, W_A)$ は自動車を用いたトリップ時間費用であり、基本モデルと同様、 $C_Q > 0, C_W < 0$ であるものとする。 $C_B$ は鉄道を用いた場合のトリップ時間費用であ

<sup>9</sup> より直接的に示すには、 $\int_0^Q P(q) dq - (C(Q, W) + \tau)Q$ で表される消費者余剰（料金込み）を $W$ で微分したものが正になるかどうかを調べればよい。

<sup>10</sup> バスの場合、道路を使うのでトリップ費用が混雑の影響を受ける。混雑料金を導入すると、道路の交通混雑が減少してバスの速度も上昇する。Ahn(2005)は、このことを考慮して、バスの運賃政策を分析している。

<sup>11</sup> Henderson (1985)、Arnott and Yan (2000)は、より一般的なモデルを用いてこの問題を分析している。



り、その値は交通量に関わらず一定であると仮定する。 $\tau_B$ は鉄道の運賃である。なお鉄道の乗客一人当たりの運行費用は一定であり、運賃は運行費用に等しく設定されると仮定する。

交通手段別の均衡交通量は図 1-7 のように決まる。鉄道の利用者数を  $Q_B$  とすると、仮定より  $Q_A + Q_B = N$  なので、横軸上の各点では、グラフの左端からその点までの距離が自動車の交通量  $Q_A$ 、右端からの距離が鉄道の交通量  $Q_B$  を表す。道路料金が徴収されない場合、均衡は点 E において達成される。この点において自動車と鉄道のトリップ費用は等しくなっており、各個人は交通手段を変更する誘因を持たない。この状況は、Pigou (1920) と Knight (1924) の論争で用いられた例、すなわち混雑する道路と、時間はかかるが混雑の生じない迂回道路との間の経路配分問題と同じ構造を持っている。迂回道路を鉄道に置き換えれば、彼らの議論がそのまま適用される。道路の混雑を緩和しようと道路容量を拡大すると、自動車トリップ費用曲線が右下にシフトする。新しい均衡はシフトした自動車トリップ費用曲線が  $P_B$  に等しくなった点で達成される。

したがってトリップ費用は道路容量を拡大しても不変である。道路を整備しても混雑の水準は緩和されず自動車交通量が増え鉄道の利用は減少するのみである。そして社会は道路整備のための費用を負う<sup>12</sup>。

社会的に最適な交通量分担は、社会的総費用  $C_A(Q_A, W_A)Q_A + P_B Q_B$  を最小化するような  $Q_A$  と  $Q_B$  の組み合わせである。最適条件は  $C_A(Q_A, W_A) + \frac{\partial C_A}{\partial Q_A} Q_A - P_B = 0$  なので、最適点は図における点 O で与えられる。

図より明らかなように、均衡における自動車交通量は過大である。最適な交通量分担を実現するためには、道路利用に対し混雑の外部効果  $\frac{\partial C_A}{\partial Q_A} Q_A$  に等しい料金を課すればよい。

<sup>12</sup> より詳細な議論は Arnott and Small (1994) において与えられている。

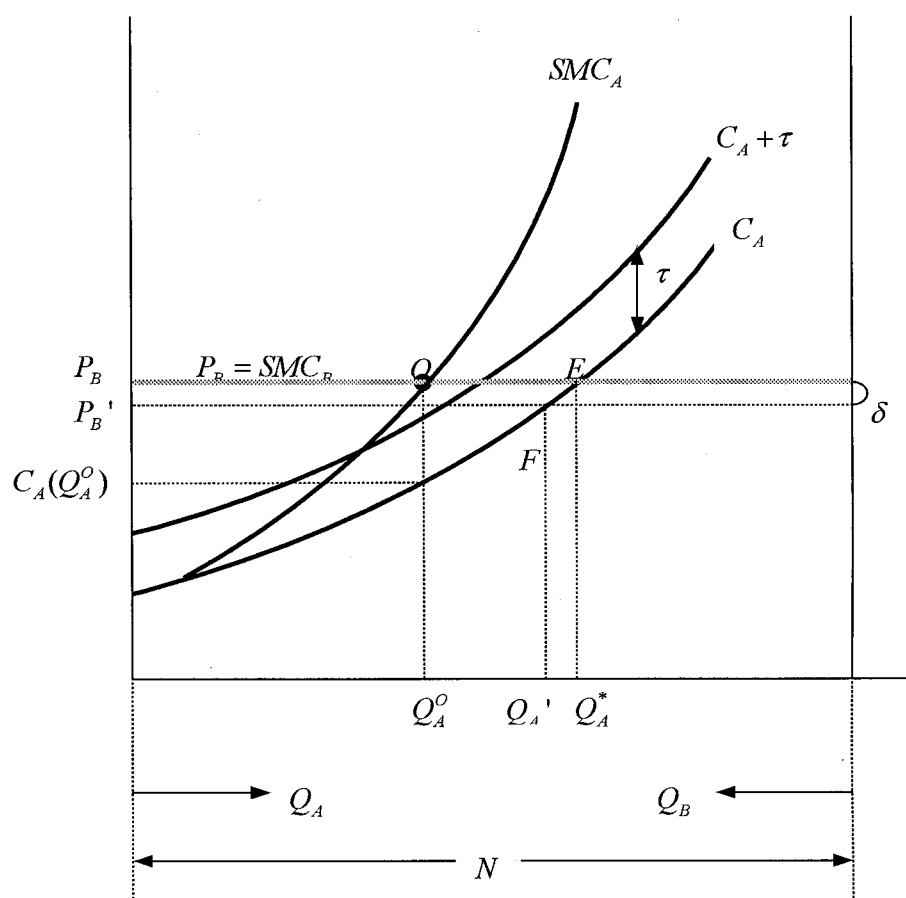


図 1-7 交通手段選択と鉄道運賃割引の効果

様々な社会的制約のために混雑料金が実施できない場合、自動車交通を鉄道に転換させるための方策として、公的補助による鉄道運賃の値下げが考えられる<sup>13</sup>。図 1-7 に示すように、鉄道運賃を  $\delta$  だけ値下げした場合、鉄道利用のトリップ費用は  $P'_B$  に低下し、新たな均衡における自動車交通量は  $Q'_A$  になる。このような運賃値下げにより、均衡におけるトリップ費用が低下した分、すなわち  $N\delta$  に等しい社会的便益が得られる。しかしそのために  $\delta Q'_B$  に等しい額の公的補助が必要なので、社会的純便益は  $\delta Q'_A$  である。実証研究によると、公共交通の運賃に関する自動車トリップの交差弾力性は非常に低い<sup>14</sup>。トリップ費用の内

<sup>13</sup> 公的補助を施設整備や本数の増加などサービスの改善に用いても同様の効果が得られ、 $P_B$  を下方にシフトさせる。

<sup>14</sup> Button (1993) の p.47 には実証分析に関するレビューとその含意について論じられてい

運賃の割合が小さい（すなわち時間費用の割合が大きい）場合、運賃をゼロにしても交通混雑を大きく軽減するほどには自動車トリップから公共交通への転換は期待できない。むしろ本数の増加などサービスの改善のために公的補助を用いる方が有効である可能性がある。

一方、道路利用に対して料金を課し、その収入を鉄道運賃値下げのための補助に用いることは有効である。このとき混雑の外部性を内部化するような最適料金より少ない額で最適な交通手段分担を達成できる。混雑料金に対する社会的合意を得ることが難しいことはすでに述べたが、その額が低ければ合意を得ることは相対的に容易であろう。また、単なる鉄道運賃補助の場合には別の税負担が必要であったが、この場合は不要である。

上の例では、鉄道サービスの供給費用が乗客数に比例すると仮定していたが、鉄道の場合、線路や駅の施設など、乗客数にかかわらず必要とされる大きな固定的費用が存在する。この場合、上の分析は修正を受けることになる。鉄道サービスの平均費用が乗客数とともに減少し、運賃が平均費用に等しくなるよう設定されているものと仮定しよう<sup>15</sup>。このとき鉄道によるトリップ費用は図 1-8 の  $P_B$  曲線のようになり、均衡における手段別トリップ数は点 E で決まる。このとき道路の整備は、混雑の問題をより悪化させる。道路容量を  $W_A$  から  $W'_A$  に拡大すると自動車トリップの費用曲線が右下にシフトし、新たな均衡が点 E' に移る。この点では均衡トリップ費用が道路整備前よりも増加している。それは鉄道利用者の減少により平均費用が増加し、その平均費用と均衡するまで道路の混雑が増えるためである。これは Downs-Thomson パラドックスと呼ばれている（Arnott and Small (1994)）。さらに道路容量を  $W''_A$  にまで拡大すると鉄道事業は存続できなくなり、均衡点 E'' ではすべてのトリップが自動車で行われるようになる。このとき混雑の水準は整備前よりもさらに悪化する。

---

る。

<sup>15</sup> 実は公共交通に規模の経済が存在しなくても、トリップ費用が乗客数とともに減少すると想定することができる。乗客数が増えると列車の本数が増加するので、駅で列車を待つ時間が減少するためである。



上の例と同様に示すことができる。

### 1-3-3 所得分配への影響

基本モデルは同質の個人から成る経済を暗黙に想定していたが、現実の経済では人々の間で所得や選好が大きく異なっており、このように異質な人々が同じ道路を同時に利用している。このとき混雑料金をはじめとする諸政策から受ける影響は、異質な人々の間で異なる。混雑料金が社会全体にとって好ましい政策であっても、それによって不利益を受けるグループの反対が強い場合、実行は困難である。

混雑料金に対する有力な批判として、それが高所得の人々よりも低所得の人々の厚生をより悪化させる逆進的政策であるという指摘がなされている。所得が高いことが時間当たり賃金の高いこと、そしてトリップ時間の機会費用（時間価値）が大きいことを意味するのであれば、混雑料金は逆進的な政策になる可能性が大きい。

個人のトリップ費用は時間費用と料金の和であり、無料金均衡および混雑料金賦課の場合のトリップ費用を、それぞれ、 $\alpha T^*$ 、 $\alpha T^0 + \tau$ と表そう。ここに $T$ はトリップ所要時間、 $\tau$ は道路料金、そして $\alpha$ は時間価値である。混雑料金の賦課によりトリップ所要時間は $T^* - T^0$ だけ減少する一方、個人の負担は $\tau$ だけ増加する。したがって個人にとってのトリップ費用の変化は次の式で計算される。

$$-\alpha(T^* - T^0) + \tau$$

時間価値の異なる人々が同じ道路を利用する場合、 $\tau$ と $T^* - T^0$ は全員にとって共通である。このとき上の式より、時間価値（すなわち所得）が高いほど第1項の効果が大きくなるので、トリップ費用が増加するにしてもその額は小さく、減少する可能性もある。すなわち混雑料金の導入は低所得のグループに対して相対的に大きな損失を与え、高所得のグループは厚生が改善される可能性もある。Small (1983)は、仮想的にサンフランシスコ湾岸地域の幹線道路でピーク時に1ドルの料金を課した場合について詳細な分析を行った。低所得の通勤者は0.28ドル、中所得の通勤者は0.13ドルの損失を被る一方、高所得の通勤者は0.08ドルの便益を得ると推定した。

しかし以上の結果は、混雑料金の収入がどこに支出されるかを考慮していな

い。Richardson and Bae (1998)が述べるように、混雑料金の実施が所得分配に与える影響は、料金収入をどのように使うかに依存する。たとえば混雑料金を徴収する代わりにガソリン税率やその他の税率を下げることで、損失を相殺することは可能である。また 1-3-2 で見たように公共交通の運賃を値下げすることは、効率性のみならず所得分配にも好ましい影響を与える。所得の低い人ほど車を持たず公共交通に依存する割合が高いからである。たしかに混雑料金を導入すると低所得の人々ほど自動車トリップを断念することになるが、それらの人々が公共交通に転換するならば所得分配に対する負の影響を軽減することができる。実際、2003 年からロンドンにおいて混雑料金を開始した際には、バス本数の大幅な増加を行った。その結果バス待ち時間の短縮と、混雑の緩和によるバス交通の遅延減少が報告されている<sup>16</sup>。このような変化は、もともと公共交通に依存していたグループに大きな便益をもたらしたといえる。

しかし混雑料金と所得分配の問題は単純ではない。所得の高いことが時間価値の高いことを意味するとは限らない。急病のときなど、1 分でも早く目的地に着くことに対する支払い意思額は、所得が低くても（少なくとも平時における高所得者の時間価値よりも）大きなものであろう。また微視的に見れば、同じ所得階層であっても各個人の職業やその他の属性により帰着の内容は異なり得る。居住地域によっては公共交通のような代替手段が利用できない場合があり、そのような地域に住む者は混雑料金の支払いを避けることはできないので、他の地域よりも負の影響が大きくなるだろう。また公共交通への補助にしても、それによって便益を受ける人と混雑料金により道路利用を断念する人が重なっているとは限らない。

上述のような限界はあるものの、政策当局は混雑料金の導入による負の影響を防止するために料金収入が用いられるよう、政策パッケージを注意深く設計する必要がある。そしてそのような政策の確実な遂行を公約し、その遂行能力についても人々の信用を獲得することが混雑料金の実施を可能にするための重要な条件といえる。

---

<sup>16</sup> ロンドン交通局のホームページ([http://www.tfl.gov.uk/tfl/cc\\_london/cc\\_monitoring.shtml](http://www.tfl.gov.uk/tfl/cc_london/cc_monitoring.shtml))にもとづく。

## 1-4 時間、都市空間、ネットワーク

本書の第2章以降では、時間と空間を導入した交通混雑の経済分析について具体的に展開されるが、ここでは本書の構成に沿って従来の研究を概観し、本研究の位置付けを明らかにしておく。

### 1-4-1 時間

交通混雑の水準は時間とともに大きく変動する。たとえば朝のラッシュアワーには住宅地から業務地区への交通が集中的に発生して大きな混雑を引き起こすが、それ以外の時間帯は空いている。短期的に交通容量は不変であるのに対し、季節ごと、曜日ごと、そして一日のうちでも時間帯ごとに交通需要が変動するからである。これは生産や消費を貯蔵できないという交通サービスの特性から必然的に生ずるものである。このような問題は交通ばかりではなく他の公益事業においてもしばしば生じる。たとえば電力についても、夏は冷房のために需要が大きい、春や秋は小さい。また一日のうちでも昼間と夜間では電力需要が大きく異なる。

以上のように施設の容量を更新する周期に比べて需要変動の周期が非常に短い場合に、料金と容量をいかに決めるべきかという問題はピークロード問題と呼ばれる。標準的なアプローチは、ピークとオフピークの二つの市場を想定して、最適な料金と容量を求める問題を解くというものである<sup>17</sup>。

交通に関する最も重要なピークロード問題は通勤ラッシュアワーである。ピークロード問題の標準モデルでは、異時点間の代替を考慮していないか、していても上記のようにピークかオフピークかという二選択肢しかない場合が多い。ラッシュアワーの混雑を緩和するためには、ピークかオフピークかという選択よりも、ピーク時間帯内の変動を制御することの方が現実的で有用である。

Vickrey(1969)は通勤者の出発時刻選択行動を定式化し、ラッシュアワー中の交通混雑の時間変動を記述する動学モデルを構築した。このモデルは二つの点

---

<sup>17</sup> このタイプの研究に関する、詳しい説明は松川(2003)において与えられている。

で独創的な新しい枠組みを提示した。一つは勤務先への希望到着時刻（たとえば始業時刻）からの乖離をスケジューリング費用と定義し、これと交通混雑とのトレードオフを通じて通勤者の出発時刻分布を内生化したこと。もう一つは交通混雑をボトルネック後方に伸びる待ち行列として定式化することにより、解析的に取り扱いやすい形で混雑の動学的分析を可能にしたことである。ところが Vickrey の研究は、その執筆スタイルにも起因して、刊行後長い間注目されることはなかった<sup>18</sup>。このモデルの重要性に注目したのは交通工学の研究者たちであった。たとえば Hendrickson and Kocur (1981), Daganzo(1985)らは、均衡の存在や一意性などに関する理論的な検討を行った<sup>19</sup>。そして経済学でも、Braid (1989), Arnott, de Palma and Lindsey(1990a)以降、様々な拡張がなされ、標準的分析ツールとして確立するに至った。

一方、Henderson(1981)は 1-2 で示した伝統的静学モデルと同様の混雑関数（交通量に関して単調増加）を用いてラッシュアワーの問題を分析した。この場合、交通混雑の時間変動のパターンは、Vickrey モデルによるものとはかなり異なっている。本書の第 3 章では Vickrey タイプのモデルと Henderson タイプのモデルの解説とそれらの比較を行っている。

時間を考慮した動学分析は、交通渋滞の問題を取り扱う上で重要な役割を果たす。交通渋滞はきわめて非効率な状態であり、それによる経済損失も大きいので、有効な対策の立案が求められている。交通渋滞はその長さが伸びたり縮んだりすることからもわかるように、動学的分析が必要である。Lighthill and Whitham (1955)は、交通流を流体として取り扱う理論を展開し、渋滞の時間的推移を衝撃波の運動として定式化した。交通工学においては、このモデルにもとづく理論・実証・応用研究が蓄積されている。なお交通混雑の基本モデルで用いられる静学的な混雑関数（フロー混雑とも呼ばれている）はこの流体モデルの定常状態に対応している。また Vickrey のボトルネックモデルは衝撃波の理論を大胆に簡略化したものである<sup>20</sup>。経済学では、フロー混雑とボトルネッ

---

<sup>18</sup> この点について Arnott(1994)の pp.274-275 では「珠玉のようなアイディアにあふれているのに、それらを強調するなどの工夫もなく無造作な文体で書かれているため…」と述べている。

<sup>19</sup> この点については桑原(1998)が詳細な解説を与えている。

<sup>20</sup> Arnott (1994)は、当時 Vickrey が交通工学の研究動向を把握しており、それに基づいて



ク混雑がそれぞれまったく別の理論にもとづいて構築されたモデルのように説明されることが多いが（たとえば金本(1997)、竹内(1999)）、それらはいずれも流体理論から導かれたものである。本書の第2章と第3章では、この点について明らかにし、流体理論にもとづいた交通渋滞の動学モデルを用いて経済分析を行っている。

ところで Henderson (1981)にはもう一つ重要な貢献が含まれている。それは既存のモデルで与件とされていた、通勤者の希望到着時刻（すなわち企業の始業時刻）の分布を内生化したことである。都市に立地する企業は互いに頻繁に取引をするために集積しているので、他の多くの企業と同時刻に業務を開始することが望ましい。このような時間に関する集積のメリットを考慮しながら混雑を避けるための時差通勤を導入するインセンティブを定式化した。このようなアプローチは、ラッシュアワーの混雑を平滑化するための交通需要マネジメント政策の分析を行うために有用である。本書の第4章では、フレックスタイムに関する経済分析を行っている。

#### 1-4-2 都市空間

都市空間における交通混雑の分析は、主として都市経済学者によって行われた。1970年代に Mills and de Ferranti (1971), Solow and Vickrey (1971), Kanemoto (1980)らは、一次元の連続空間において各地点の混雑水準が内生的に決まるモデルを構築し、土地利用の均衡を求めるとともに資源配分の問題を分析した。このような研究の背景には、交通混雑問題を解決するために交通施設を整備するだけではなく、土地利用の改編を含めて総合的に計画しようという考え方が有力になったことが指摘できる。

すべての生産活動が集中する都心があり、その周辺に住宅地が広がる単一中心都市を想定しよう。各地点の土地は住宅か道路に利用され、交通容量は道路面積に比例するものと仮定する。すべての住民が都心に通勤するので各地点における交通量はその地点より外側から発したトリップ数の合計である。都心に近づくほど通過交通量が増加し混雑水準が高くなるが、このことを考慮して各

---

彼のモデルを考案したと述べている。

世帯は効用を最大化するように立地点と住宅地の広さを選択する。立地均衡では住宅の立地分布と地代、そして各地点における混雑水準が決定される。混雑料金のような政策的介入がない場合、均衡における土地利用分布は非効率である。ある地点から発するトリップは、その地点から都心までの区間で交通量を一台ずつ増加させる形で混雑の外部効果を発生させる。したがって都心から離れた所に住む者ほど大きな外部効果を発生させることになるが、それが内部化されないと立地分布が過度に分散する。最適な土地利用を達成するためには、各地点で発生させる外部効果に等しい混雑料金を徴収すればよいが、その額は都心からの距離が大きいほど高くなる。このような政策は長距離の通勤を抑制する効果があるので、最適な土地利用が達成されたとき、無政策の場合よりも高密度で都市の広さもよりコンパクトになる。

これらの研究では都市空間の各地点ごとに道路用地をどのように配分すべきか、という問題が分析された。上記のモデルによると、都心に近いほど混雑が激しいので道路容量（＝道路面積）拡大の便益が大きい。しかし都心に近い場所は住宅地としても魅力的なので価値が高い。このとき立地点ごとに、道路容量拡大の便益と費用の間のトレードオフが存在する。

最適な混雑料金を課している場合、

道路容量拡大によるトリップ費用減少＝容量拡大費用  
のような費用－便益基準にしたがって道路面積を決定することが最適である。  
なお容量拡大のために土地のみが用いられる場合、そのための費用は道路用地の地代に等しい。そしてその地代は住宅地の地代とも等しくなる。なお Solow and Vickrey (1971)は、単一中心とは対照的に、線形空間に立地するすべての経済活動間で互いに一定数のトリップを行うと仮定したモデルにもとづいて、道路への土地配分問題を分析している。この設定は業務地区内部の土地利用を対象とするものと解釈できる。

上述のように、最適な配分を実現するためには、都市内の各地点で異なる額の混雑料金を徴収する必要があるが、そのような政策を現実に応用することはきわめて困難である。このような混雑料金を課していない場合は費用－便益分

析基準により道路整備を進めることは効率的ではない。Kanemoto (1980)は、混雑料金を課さない状況で次善の政策として、各地点の道路容量を最適に決定する問題を分析した。次善の状況では、ある地点の道路容量すなわち道路面積の変化が他のすべての地点における土地市場に影響を与えるので、このような波及効果を考慮した複雑な分析が必要になる。

Hatta (1983)は、都市空間モデルを用いて鉄道における混雑を分析した。鉄道路線が競争的な企業により運営されており、各企業が利潤を最大化するように運賃と容量を決定する場合、混雑が内部化され社会的に最適な資源配分が達成されることを示した。

1980年代以降は、より複雑なモデルを数値シミュレーションによって分析する研究が行われるようになった。たとえば Sullivan (1983a)は住宅だけでなくCBD内における企業の土地利用も内生的に求める一般均衡モデルを用いて、シミュレーションを行った。Anas and Xu (1999)は、企業の立地が都市の中心部に限定されない、非単一中心都市モデルにもとづいて交通混雑の空間分布を分析した。

以上のような都市空間モデルによる研究では、混雑料金をまったく徴収しない場合か、最善の混雑料金を徴収する場合かという、両極端のケースのみを想定していた。上述のように、次善の政策として道路容量の選択を取り扱った研究はあるが、次善の料金政策に関する分析はほとんどなされていない<sup>21</sup>。シンガポールやノルウェー、あるいは最近のロンドンなどで実施しているシステムは、いずれも最善ではないが実施の容易な次善の料金政策である。次善の料金政策に関する経済分析は、既存のシステムの有効性を評価すること、そして料金システムをどのように設計すべきかについて示唆を与えることができる。本書の第II部の第5章と第6章では、都市空間モデルを用いて、代表的な次善の政策であるコードン料金システムについて分析している。

---

<sup>21</sup> Sullivan (1983b)および Kraus(1989)は例外である。前者では Sullivan (1983a)と同様のモデルを用いてガソリン税の効果を分析した。しかしガソリン税は混雑の水準に関係なく設定され、都市部や周辺部に関係なく税率も一律なので、混雑対策としては限界がある。Kraus(1989)は都市空間モデルにもとづいてコードンプライシングを取り扱った最初の研究である。彼のモデルでは、混雑料金が各地点に立地する家計の交通手段選択に影響を与えるものと想定されている。

### 1-4-3 ネットワーク

空間分析へのもう一つのアプローチは、ネットワーク空間を対象とするものである。ネットワークとは、図 1-9 に示すように、空間上に散在する離散的な点（ノード）とそれらを結ぶリンクから成る。トリップの発地と着地はネットワークにおけるノードで表される。トリップを行う人は、発地から着地までどのリンクを通って行くかという、経路選択を行う。このような個々の経路選択の集計として各道路における交通量と混雑水準が決まる。発地から着地までの交通量が与えられたときにそれらが各経路（あるいは各道路リンク）をどのように流れるかを求めることを交通量配分(Traffic assignment)と呼ぶ。

いま道路ネットワークに沿ってトリップを行う者が、旅行費用の最小となる経路を選ぶものと仮定しよう。道路に料金が課されていない場合、最小費用経路は最短旅行時間経路である。Wardrop(1952)は次のような交通量配分原理を提示した。

「(均衡において) 利用される経路の旅行時間はみな等しく、利用されない経路の旅行時間はそれよりも大きいかせいぜい等しい」

Beckmann(1956)は上の原理を数学的に定式化し、均衡条件式が最適条件として得られる数理最適化問題を示した<sup>22</sup>。そして非線形計画法の理論を用いて均衡解の存在と一意性に関する検討を行った。この Beckmann のモデルは経済理論としても独創的であるが、交通工学における交通量予測にとってきわめて重要な貢献を含んでいた。しかしそれが引用されるようになったのは、Dafermos (1969), LeBlanc(1975), Evans (1976)以降である。その間にも、交通工学の分野では独立に交通量配分の研究が行われていたことから、学際的な交流の欠如が悔やまれる<sup>23</sup>。交通ネットワーク均衡に関する工学的研究では、多数のノード、リンクから成る大規模な道路網について均衡解を計算するアルゴリズム開発が最も重要な課題であり、膨大な研究が蓄積されている。現在ではソフトウェア・

---

<sup>22</sup> 近年盛んに研究されているポテンシャル・ゲームの理論の源流とも解釈できる。

Sandholm(2001)は、Beckmann モデルをポテンシャル・ゲームとして取り扱い、需要関数や走行費用のパラメータに関する情報なしに最適な混雑料金を求めそれを遂行する方法を提案した。

<sup>23</sup> Boyce(1994)はこの間の経緯を説明している。

パッケージも数種類開発されるなど、交通計画の実務への導入も進んでいる。また交通手段分担との統合モデル、確率的利用者均衡、動学的交通量配分、ネットワーク設計など多様な拡張が行われており、交通工学における主要な研究分野の一つである<sup>24</sup>。

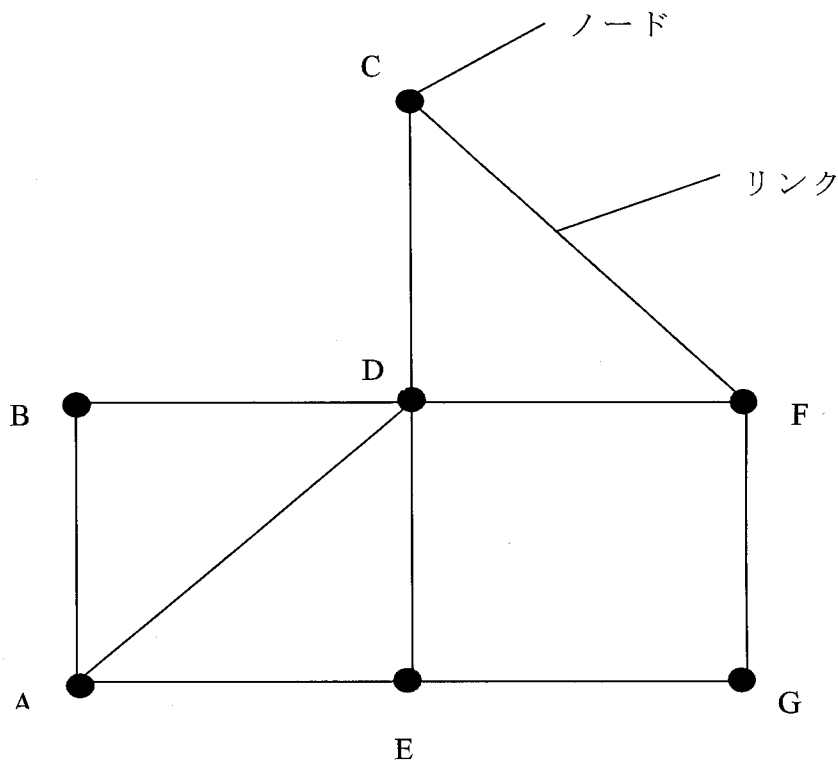


図 1-9 ネットワーク

ネットワーク均衡モデルの応用研究は膨大な数になるが、料金政策を取り扱うものは相対的に少ない。その中でもほとんどの研究はシステム最適、すなわちすべてのリンクで外部効果に等しい混雑料金を徴収する状況を想定していた。都市空間の場合と同様、そのような政策は現実的ではないので、一部のリンクでのみ料金を徴収するという次善の政策を考えることが有益である。交通量配分の効率性を改善するための次善料金に関する研究が行われるようになったの

<sup>24</sup> 交通ネットワークに関する研究全般については土木学会(1998)を参照されたい。

は比較的最近のことである（たとえば文(1993b)、Verhoef, Nijkamp, Rietveld (1996), Small and Yang (2001), May, Milne (2000)、Santos, Newbery, Rojey (2001)、Verhoef (2002)、Zhang and Yang (2004)）。本書の第7章と8章では、1つのODペアについて複数の並行する経路がある場合に関する基礎的分析を行った後、第9章においてより一般的なネットワークを対象として次善の料金政策に関するシミュレーションを行う。

## 付論：ロードプライシング実施の事例

世界のいくつかの都市では、混雑対策や道路財源を目的として、ロードプライシングが実際に行なわれたり、あるいは計画されている。これらは、上で述べたような理論どおりに実施しているわけではないが、様々な工夫が見られ、それらは今後の適用に向けて参考になる情報や教訓が多く含まれているので、以下に一部を紹介する。

シンガポールでは、1975年に Area License Scheme と呼ばれる方式の課金を開始した。これは、都市中心部に規制区域を設定し、朝のラッシュ時間帯にその規制区域を通行する車両に通行許可証を購入させ、それをフロントガラスなどに提示することを義務付けるものである。規制区域の境界にはゲートがあり、そこで通行許可証を提示ししているかチェックするとともに、区域内では警察が徹底的な監視を行ない、通行許可を持たずに通行する車を摘発することになっている。導入後に行なった調査によると、ドライバーの反応は敏感で、導入前に比べて走行速度が平均で22%も増加したことが報告されている。その結果、特に時間的、空間的境界で交通パターンが激変することが明らかとなった。すなわち規制時間帯の直前に交通量が集中したり、規制区域の境界のすぐ外側に企業が立地したりする。なおシンガポールでは、最近、フロントガラスに貼る許可証から、スマートカードという電子システムに切り替えられ、それに伴い課金方式もコードン料金制に変更された。シンガポールの場合、混雑料金により、道路利用を抑制するだけでなく、自動車の保有に対するきわめて重い税を組み合わせることによって、効果的な混雑対策を実現している。

香港では、1985年に Electronic Road Pricing(ERP)の導入が計画され、実験まで行なった。その方法は、あらかじめ設定された混雑区域の境界を車が通過するときに、電子機器によってナンバープレートを読み取り、1ヶ月分の料金を後にまとめて請求するというものである。実験の結果、ナンバープレートの読み取り精度はきわめて良好であることが報告された。しかし課金に関連してプライバシーが侵害される恐れがあるという導入反対論が議会において勝利を収め、結局実施されなかった。ここで得られた教訓としては、技術的障害よりも社会的合意を得ることの方が難しいので、計画の早い段階でどのような反発がありうるかを予測し、その対策を十分に行なう必要が指摘されている。さらには収入が市民にどのように有益に使われるかを明らかにする必要もあるだろう。

1995年には、米国のカリフォルニア州で新設された高速道路(91 Express lanes)において、時間帯ごとに変動する料金が導入された。この道路は、既存の高速道路(無料)に新しく2車線を追加したものであるが、民間企業が運営している。そこでは、HOVは常に無料であるが、それ以外の車両は時間帯によって0.25-2.5ドルに料金の変動する。このような時間帯別変動料金は、トリップを行なう時刻の変更を促すことを通じた混雑緩和に有効である。

韓国のソウルにおいても、中心部に流入する車のために混雑する2箇所のトンネルの通過に対して、きわめて安価ながら、1996年より料金を徴収することにした。都心に入るには、他の迂回道路を用いれば料金は徴収されないもので、この料金制実施は交通量配分に大きな影響を与えた。わずかな料金であっても、人々のトリップに関する意思決定に対する影響は大きいことが改めて示された。

混雑緩和を目的とするものではないが、1986年から91年にかけて、ノルウェーの三都市では道路整備の財源とする目的で、コードン料金制が実施されている。

英国では1964年のスミード・レポート以来、40年間、何度か混雑料金の導入が議論されてきたが、実現には至らなかった。ところが2000年、ロンドン市長にケン・リビングストン氏が混雑課金を公約に掲げ当選したことを契機として、急速に具体化することになった。導入までに数多くの調査分析と市民参加

による合意形成の努力が行われた。たとえば TfL (Transport for London、ロンドン交通庁) のホームページによると、このたびの課金導入の必要性として「ロンドン中心部のドライバーは半分の時間を渋滞の中で過ごしている」「ロンドンでの週あたり混雑の損失は 200-400 万ポンド」であることが示されている。

ロンドンにおける混雑料金制は 2003 年 2 月 17 日から開始された。その内容は次の通りである。

- ・月一金の朝 7 時から夕方 18 時までの間に都心部に流入する各車両に対し、1 日あたり 5 ポンド (約 1000 円) の料金が課される。(ただし課金ゾーン内の居住者は 90% の割引、他にも様々な割引)
- ・利用者は事前 (または当日の 22 時まで) にナンバーをデータベースに登録し料金を払う
- ・各種の支払い方法が利用可能 (インターネット、ガソリンスタンド、コンビニエンスストア、電話でクレジットカード、課金地域内の自動支払機)
- ・課金地域の境界線や課金地域内のカメラでナンバープレートを読み取り、データベースに登録されているかチェック
- ・違反には 80 ポンド (ただし 14 日以内に払えば 40 ポンド)、28 日を経過したら 120 ポンド

TfL は導入から 3 ヶ月、6 ヶ月、1 年、そして 2 年経過後に効果を評価する報告書を発表している<sup>25</sup>。2 年経過後の報告書によると、その効果は以下の通りである。

- ・交通パターンは安定しているが、課金地域内の交通遅延が課金前に比べ 30% 減少、これは TfL の予想した楽観値に近い
- ・課金地域に関係するトリップの所要時間が平均 14% 減少、信頼性が 30% 向上
- ・課金地域に流入する自動車の数は 6 万台減少した。これらの内 20-30% は周辺地域に分散、50-60% は公共交通に転換、15-20% は車の相乗り、自転車への転換、課金時間帯以外のトリップ、トリップそのものの削減など、上記以

---

<sup>25</sup> <http://www.tfl.gov.uk/tfl/downloads/pdf/congestion-charging/cc-6monthson.pdf> からダウンロード可能



#### 外の形態

- ・バスは初めて乗客増（バスの本数増の効果も含む）公共交通は車からの転換利用者をバスネットワーク容量の増大によってよく処理している。
- ・バス乗客の待ち時間が、混雑減少とバスの本数増加により 1 / 3 以上減少。

- ・混雑課金が経済活動に弊害をもたらすという懸念は当たらなかった。ロンドン中心部を訪れる人の数は減少したが、それは他の原因によるものである。

- ・混雑課金により、2004年度は9000万ポンドの収入を得た。これらの収入は主としてバス・ネットワークの整備に使われた。

以上の結果は、導入前の予測とほぼ一致するものであり、混雑料金が有効であることを示している。この成果を受けて、市では課金地域の西への拡大と、料金を 8 ポンドに値上げすることを提案している。

ロンドンにおける成果は、世界中で大きな関心を呼んでおり、混雑に悩む多くの都市にとって、道路利用に対する課金は有望な政策の選択肢として現実のものとなりつつある。

## 第Ⅰ部 時間を考慮した動学分析

## 第2章 交通渋滞と動学的外部性\*

### 2-1 はじめに

今日、大都市ではいたる所で日常的に渋滞が発生しているが、交通混雑による経済的損失の大半はこの渋滞によるものといわれている。交通経済学では交通渋滞を「超混雑」(hyper-congestion)と呼び、伝統的な静学モデルにもとづいた議論が行われてきた<sup>1</sup>。しかし後で詳しく述べるように、交通渋滞は動的な現象であり、静学モデルでは適切に取り扱うことができない。

読者はたとえば「〇〇トンネルを先頭に渋滞5 km」などという交通情報を日常的に見かけるだろう。もし渋滞に巻き込まれた場合、その〇〇トンネルの所までノロノロ運転が続いた後、急に交通がスムーズに流れることもよく経験することである。トンネルの入り口や、橋の手前、二本の道路が合流する場所などは、道路の他の部分よりも幅が狭かったり、合流する車両により交通流が攪乱されるので、単位時間に通過できる交通量すなわち交通容量が小さくなる。このような道路上の地点はボトルネックと呼ばれる。上流からの交通量が多いと、ボトルネックを通過できず超過した分がその後方に溜まって行くのが渋滞の原因である。

現在までのところ最も有力な交通渋滞の理論は、交通流を圧縮性流体として取り扱うモデルであり、これは1950年代に Lighthill and Whitham (1955)により

---

\* 本章は、文(1993a)、および Mun(1994)に基づいているが、大幅に加筆修正されている。

<sup>1</sup> 多くの論者は、交通量に対して描かれた交通費用曲線が反転(backward bending)するとし、そのような費用曲線と需要曲線の交点で均衡を定義したが、これはまったくの誤りである。この問題の取り扱いをめぐって、交通経済学者の間で1980年代から大きな論争が起きたが、論争の参加者たちはいずれの側も交通現象を正しく理解していたとはいいがたい。当時の経済学者は、すでに交通工学では確立していた交通流理論に関する研究成果をほとんど参照していなかった。近年になって、Verhoef(2003)、Small and Chu(2003)など、経済学者からも従来の議論に関する誤解が指摘され、混乱も解消に向かいつつあるようである。したがってこの問題について本文で議論することはせず、付論2-Aにおいて紹介することにする。

定式化されたものである。その後、主として交通工学の分野で理論的研究とともに、渋滞現象の調査、分析、モデルの適用など膨大な研究成果が蓄積されている。また渋滞対策として高速道路の入路制御などといった物理的規制手段についての研究もなされ、一部は実用化されている。このような知見が経済学者の間で十分に知られてはいなかった。

本章では、上記の流体理論を適用して交通渋滞の動的モデルを構築し、それに基づいて、交通渋滞が生ずる場合の資源配分上の問題を明らかにする。交通渋滞の先頭付近にいる車は渋滞の後尾にいる車よりも早い時刻に道路に入ったことに注意されたい。すなわち異なった時刻に道路利用を選択した車が同じ交通渋滞に加わっているのである。先頭にいる車が道路利用をやめていれば、後続の車にとって渋滞の長さはこの一台分だけ短く済んでいたはずである。すなわち早く道路に進出した車が後続の車に外部効果を与えているのである。本研究ではこれを動学的外部効果と呼ぶ。

以下、2-2 では交通流理論の基本について解説する。2-3 では、渋滞の発生と変遷メカニズムを記述するモデルを提示し、それに基づいて渋滞する道路における交通費用を定式化する。2-4 では、時々刻々と変動する交通需要に対して、均衡解と最適解を決定する条件を示す。さらに最適な道路利用を分権的に達成するための混雑料金を導出する。

## 2-2 交通流理論

交通流理論にはいくつかのアプローチが存在するが、ここでは交通流を圧縮性流体とみなして定式化したモデルを取り上げる。第1章で紹介した、交通経済学における混雑の理論もこの流体モデルに基づいている。

交通流の状態を表現する基本的変数として、交通量 $Q$ （台/時）、速度 $V$ （Km/時）、そして密度 $K$ （台/Km）が用いられる<sup>2</sup>。交通量は交通流率（flow rate）とも呼ばれるが、単位時間に道路上のある地点を通過する車の台数である。速

---

<sup>2</sup> 流体といっても、水のような液体とは異なり、密度が可変という意味で圧縮性流体と呼ばれる。

度はその地点を通過する車の平均速度である。そして交通密度は、道路の延長方向の単位距離内に、ある瞬間に存在する車の台数である。そしてそれらの間には次の式のような関係が常に成立する（具体的な導出は付論 2-B を参照されたい）。

$$Q = KV \quad (2-1)$$

また、速度は下記のように密度の減少関数として与えられる。

$$V = f(K), \quad f' < 0 \quad (2-2)$$

密度が増加すると車間距離が短くなるので、前の車との衝突を避けるために運転者は速度を低下させるからである<sup>3</sup>。上の二つの式により、 $V$ 、 $Q$ 、 $K$  の内一つの値が与えられれば他の変数の値が決まる。たとえば交通需要を表す変数として交通量が与えられれば、速度と密度がわかる。

図 2-1 は、これら 3 変数の間の関係を図示したものである。

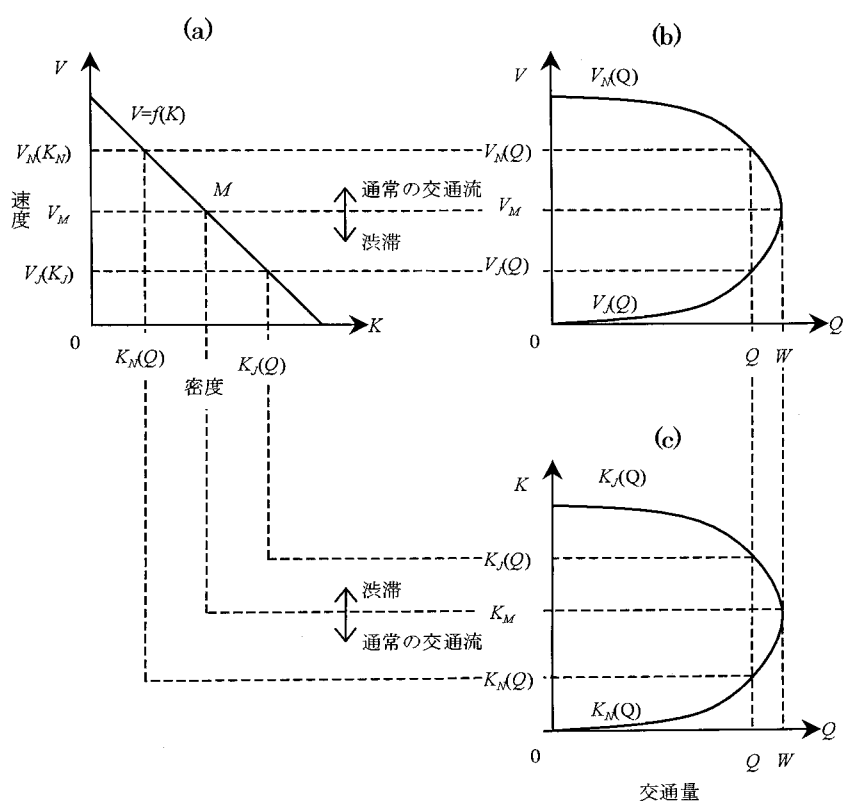


図 2-1 交通量－密度－速度の関係

<sup>3</sup> この関係は、個々の車が前を走る車との距離に応じて速度を選択する行動を定式化した追従モデルによって導くことができる。前の車の速度と距離とを考慮に入れて加減速を選択するモデルも開発されている。

上の図 2-1(b)における交通量－速度（Q-V）曲線を見ると、一つの交通量に対して速度の値が二つ存在することに注意されたい。図において下付添え字 N は交通流が非渋滞状態、J は渋滞状態であることを表わしている。すなわち速度が  $V_M$  よりも低い（密度が  $K_M$  より高い）交通流の状態を渋滞と定義している。渋滞状態はきわめて非効率である。なぜなら同量の交通を処理するのに速度が著しく低いからである。

渋滞した交通流は非渋滞の場合とは異なる性質を持つ。たとえば図 2-1(b)における曲線  $V_N(Q)$  は速度が交通量の増加とともに減少することを表しているが、渋滞状態に対応する曲線  $V_J(Q)$  は交通量の増加関数である。交通量が増えると混雑が激しくなって速度が下がるというのは直観と整合するが、 $V_J(Q)$  については奇異に感じられるかも知れない。しかし交通量の定義が、一定時間に通過する車の台数であることを思い起こせば不思議なことではない。渋滞して速度が下がると、一地点を通過する交通量が低下するのである。極端なケースとして、速度がゼロになるほど交通密度が高い状況を想定しよう。このとき車はまったく動かないので通過交通量もゼロになるだろう。そのような状態から密度が低下し速度が上がると、車が流れるようになるので交通量は正の値を持つ。このことは速度と交通量が正の相関関係にあることを意味する。交通量－密度曲線（Q-K）についても同様である。このような関係についてのより詳細な説明は付論 2-B で与えられている。

式(2-2)の  $f(K)$  の形を次のように特定化して具体的な Q-V 関係を導いてみよう。

$$f(K) = V_f \left\{ 1 - \left( \frac{K}{k_u} \right) \right\} \quad (2-3)$$

ここに  $V_f$  は自由走行速度であり、 $k_u$  は最大密度（速度がゼロの時の密度）である。この式は Greenshields (1935) が実測データをもとに提案したものであり、広く応用されている。なお本書の第 3 章におけるシミュレーションでもこの式を用いている。上の式を(2-2)式に適用し、(2-1)式と合わせて解くことにより次が得られる。

$$V_N(Q) = \frac{V_f}{2} \left( 1 + \sqrt{1 - \frac{Q}{W}} \right) \quad (2-4a)$$

$$V_J(Q) = \frac{V_f}{2} \left( 1 - \sqrt{1 - \frac{Q}{W}} \right) \quad (2-4b)$$

上の式から交通量と速度の関係が、図 2-1(b)に描いたような形になることが確かめられる。なお  $W$  は交通容量である。その定義の通り、 $Q=W$  のとき交通量が最大になることが図から見てとれる。交通容量を上記の関数  $f(K)$  におけるパラメータで表現すると、次のようになる。

$$W = k_u V_f / 4$$

以上述べたような関係は、均一な交通流の内部で成り立つ関係であることに注意すべきである。道路上の一地点ないしはごく短い区間においては、近似的に交通流が均一であるとみなせるので、この関係を適用することができる。十分長い道路区間について適用するためには交通流が定常状態であることを仮定する必要がある。なお交通渋滞の問題を分析する際、交通流の定常状態を想定することはできない。付論 2-A で論ずるように定常的に交通渋滞の状態が持続するということはあり得ないからである。

交通流の状態は時間と場所によって変動する。連続的に変化する場合もあるが、しばしば異なる状態（密度、速度が異なる）の交通流の間で不連続な変化が生じうる。たとえば渋滞列の後尾では、それより下流側で密度が高く速度の低い状態である一方、上流側は密度が低く速度の高い状態である。そのような不連続点の位置は時間とともに変化するが、その動きを衝撃波(Shock wave)と呼ぶ。

図 2-2 のように、ある時刻に不連続点の位置が  $x$  にあり、 $x$  より上流側の交通状態が  $Q_U, K_U, V_U$ 、下流側では  $Q_D, K_D, V_D$  であるとしよう。このとき衝撃波の速度は次の式で求められる（導出については付論 2-B を参照されたい）。

$$G = \frac{Q_D - Q_U}{K_D - K_U} \quad (2-5)$$

なお、 $G > 0$  の場合は衝撃波が交通流と同じ方向に伝播し、 $G < 0$  の場合は逆の方向に伝播する。

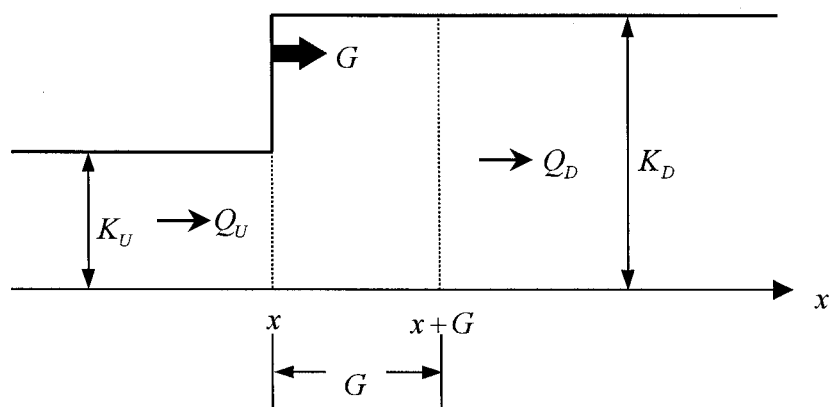


図 2-2 衝撃波

以上、本章の分析に必要な内容に限定して交通流理論の基本を解説した。より体系的な交通流理論の解説は、飯田(1992)などを参考にされたい。次の節からは、具体的に道路条件を設定して交通渋滞の時間的推移とそれに伴うトリップ所要時間の変化を求めるモデルを定式化する。

## 2-3 交通渋滞の動的モデルとトリップ費用

### 2-3-1 交通渋滞の動的モデル

図 2-3 のような道路区間を想定する。区間の終端 B に容量  $W_b$  のボトルネックがある以外は、道路区間の交通条件は均一（容量は  $W_a$ ）であると仮定する。また道路区間を走行する車の性能はすべて等しいものとする。



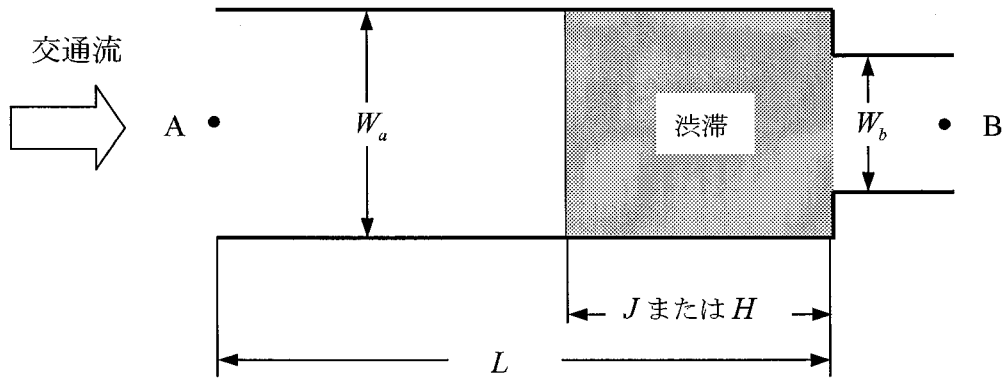


図 2-3 道路区間の構造

図 2-4 には、この道路における  $Q$ - $V$  曲線とボトルネック部分の  $Q$ - $V$  曲線を重ねて描いている。図よりボトルネック部分の交通容量が道路区間の容量よりも小さくなっていることが確認できる。

地点 A から流入する交通量は時間とともに変動する。時刻  $t$  に流入する交通量  $Q(t)$  が  $W_b$  を上回らない限り、同量の交通量が一定時間経過後に地点 B から流出し、渋滞は起こらない。このとき速度は図 2-4 より  $V_N(Q(t))$  である。しかし交通量  $Q(t)$  がボトルネックの交通容量  $W_b$  を超えると、ボトルネックを通過する交通量は容量を上回らないので、その超過分が渋滞列を形成する。このような渋滞列の内部では、連続条件よりボトルネック容量  $W_b$  に等しい交通量が流れており、速度は  $V_j(W_b)$  である。この場合でも渋滞列より上流側では流入した交通量がそのまま流れており、その速度は  $V_N(Q(t))$  である。なお渋滞が生じたとき、図 2-4 に示すようにボトルネック部分を走行する速度は  $V_b$  であり、その上流の渋滞区間で  $V_j(W_b)$  となる。同じ交通量が流れているのに、交通容量がより大きな上流部分の速度が低いことに注意されたい。たとえば高速道路のトンネルはボトルネックになる場合が多いが、その手前で渋滞が生じていてもトンネル内に入ると交通がスムーズに流れることが実際の観測データからも確認されている（たとえば巻上ほか(1983)）。

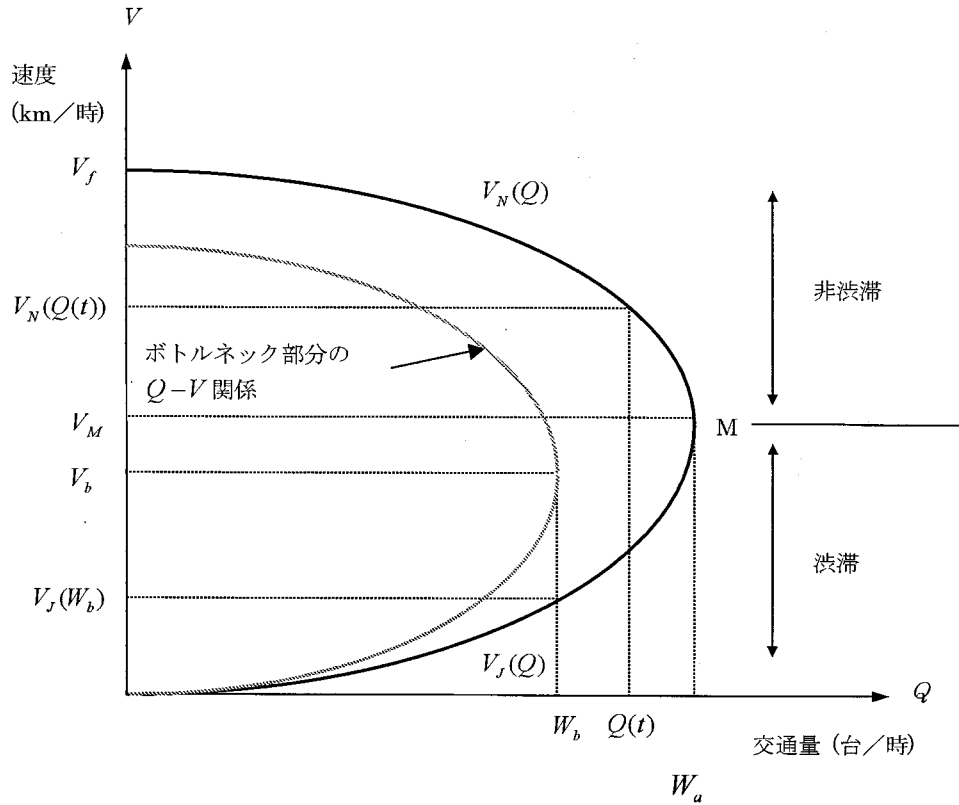


図 2-4 道路区間及びボトルネックの交通流の状態

非渋滞流と渋滞流の境界は渋滞列の後尾であり、そこでは交通流が不連続になる。図 2-1(c)の関係を適用すると、不連続点の上流側では交通量が  $Q(t)$ 、交通密度が  $K_N(Q(t))$  であり、下流側の渋滞列内部では交通量が  $W_b$ 、密度が  $K_J(W_b)$  である。この不連続点の位置は時間とともに変化するが、この動きを前節で述べた衝撃波として定式化する。(2-5)式を適用すると、衝撃波の速度  $\tilde{G}(t)$  は次の式によって与えられる。

$$\tilde{G}(t) = \frac{W_b - Q(t)}{K_J(W_b) - K_N(Q(t))} \quad (2-6)$$

上式右辺の分母は常に正であるから、流入交通量がボトルネック容量を上回る ( $Q(t) > W_b$ ) とき、 $\tilde{G}(t)$  は負の値となる。このとき衝撃波は交通流と逆の方向に伝播するので、渋滞列が上流側に延伸する。一方、 $Q(t) < W_b$  のとき  $\tilde{G}(t)$  は正となるので交通流と同じ方向に伝播する。すなわち渋滞列は縮小する。

ある時刻  $t$  における渋滞列の長さ  $H(t)$  は次式のように計算される。

$$H(t) = \int_{t_q}^t -\tilde{G}(u) du \quad (2-7)$$

ここに  $t_q$  は、流入交通量がはじめてボトルネックの容量を上回り、渋滞列の形成される時点である。なお、次のような関係が成り立つことを示すことができる (Mun(1994))。

$$\frac{d\tilde{G}(t)}{dQ(t)} = \frac{-1}{K_J(W_b) - K_N(Q(t))} + \frac{W_b - Q(t)}{\{K_J(W_b) - K_N(Q(t))\}^2} K_N'(Q(t)) < 0 \quad (2-8a)$$

$$\frac{dH(u)}{dQ(t)} = -\frac{d\tilde{G}(t)}{dQ(t)} > 0, \quad t_q \leq t \leq u \quad (2-8b)$$

### 2-3-2 渋滞する道路の走行費用

トリップは図 2-3 の地点 A から発生し、地点 B を目的地とする。道路の走行費用は料金などの金銭的費用と時間費用から成るが、時間費用は道路区間の通過所要時間に比例すると仮定する。いま  $\alpha$  を個人の時間評価値、 $T(t)$  を時刻  $t$  に地点 A を出発した車が地点 B に到着するまでに要した時間とすると、この道路区間の走行時間費用は  $\alpha T(t)$  により計算される。

時刻  $t$  に単位時間あたり  $Q(t)$  台の交通量がこの道路に流入し、このときボトルネックから渋滞列が生じているものとする。このような渋滞列の内部では、上で述べたようにボトルネック容量  $W_b$  に等しい交通量が流れているので、図 2-4 よりその速度は  $V_J(W_b)$  である。また、渋滞列よりも上流側では流入した交通量がそのまま流れ、その速度は  $V_N(Q(t))$  である。したがってこの道路を走破するための所要時間  $T(t)$  は次の式によって表される。

$$T(t) = \frac{J(t)}{V_J(W_b)} + \frac{L - J(t)}{V_N(Q(t))} \quad (2-9)$$

ここに  $L$  は道路区間の長さであり、 $J(t)$  は時刻  $t$  に流入した車が経験する渋滞列の長さである。上式の右辺第 1 項は渋滞列の内部を通過する時間であり、第 2 項は非渋滞区間を走行する時間である。なお本モデルにおいて、ボトルネックは長さを持たない点と仮定している。したがって上の式にはボトルネック部分を通過する時間が含まれていない。

さて、この  $T(t)$  と流入交通量  $Q(t)$  の関係を調べるため、(2-9) 式を  $Q(t)$  に関して

微分する。

$$\frac{dT(t)}{dQ(t)} = -\frac{L-J(t)}{\{V_N(Q(t))\}^2} \frac{dV_N}{dQ} > 0 \quad (2-10)$$

上の式より所要時間  $T(t)$  は流入交通量とともに単調に増加する。すなわちトリップ費用曲線に反転部分は存在しない。また流入交通量－走行時間の関係は一意ではなく、図 2-5 のように、そのときまでに形成された渋滞列の長さによって無数に描ける。このことは、ある時刻  $t$  における走行時間は、その時刻以前に道路に流入し、渋滞列の形成に寄与した車両に影響されることを意味する。すなわち渋滞は、異なる時点に道路を利用する車の間で外部効果を発生させる。以下ではこれを動学的外部効果と呼ぶこととするが、その具体的な内容は 2-4 において示される。

ところで(2-9)式に含まれる  $J(t)$  は、前節の(2-7)式で定義した渋滞長  $H(t)$  とは微妙に異なることに注意されたい。すなわち  $H(t)$  は時刻  $t$  に存在する（すなわち観察された）渋滞長であるのに対し、 $J(t)$  は時刻  $t$  に流入した車が経験する渋滞長である。道路区間に流入した車は渋滞の後尾に到達するまで非渋滞区間をしばらく走行するので、その間に渋滞長が変化しているはずである。すなわち時刻  $t$  に流入した車は  $\frac{L-J(t)}{V_N(Q(t))}$  を経過した後で渋滞列の最後尾に達するので、

二つの変数の関係は次のように書ける。

$$J(t) = H\left(t + \frac{L-J(t)}{V_N(Q(t))}\right) \quad (2-11)$$

そして  $J(t)$  の時間変化は次式によって記述される<sup>4</sup>。

---

<sup>4</sup> (2-11)式の両辺を  $t$  について微分し、(2-8a)式の関係を用いることにより、次が得られる。

$$\begin{aligned} \dot{J}(t) &= \dot{H}(t_N) \left\{ 1 - \frac{J(t)}{V_N(Q(t))} \right\} \\ &= \frac{-\tilde{G}(t_N)}{1 - \frac{\tilde{G}(t_N)}{V_N(Q(t))}} \end{aligned}$$

$$j(t) = \frac{W_b - Q(t)}{K_J(W_b) - \frac{W_b}{V_N(Q(t))}} \quad (2-12)$$

ここに  $j(t)$  は  $J(t)$  の時間に関する導関数である。

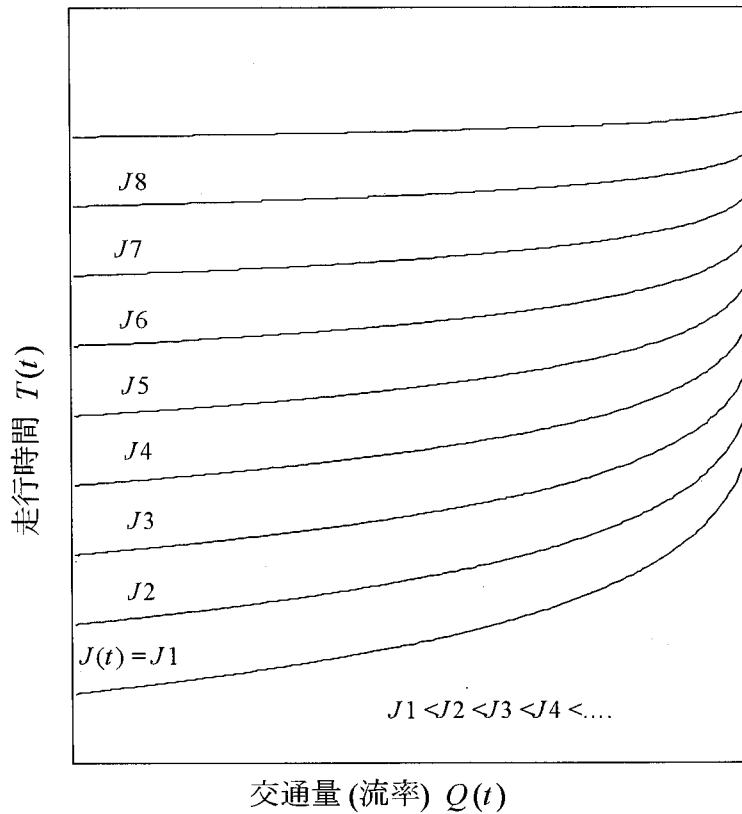


図2-5 流入交通量と走行時間の関係

## 2-4 均衡および最適道路利用

朝夕のラッシュアワーや昼間の業務時間帯のように、交通需要に関して一つのまとまりとなる時間帯を考える。その時間帯は時刻  $t_1$  に始まり時刻  $t_2$  に終わ

---

ここに  $t_N = t + \frac{L - J(t)}{V_N(Q(t))}$  である。上式に(2-6)式を代入して整理すると(2-12)式が得られる。

るものとする。道路を利用するトリップ需要は時刻ごとに変動するが、各時刻  $t$  におけるトリップ需要はその時刻に道路を利用した場合のトリップ費用にのみ依存すると仮定する<sup>5</sup>。したがって道路利用の逆需要関数は  $P(Q, t)$  のように与えられる。このとき各時刻におけるトリップ数  $Q(t)$  は次の式を満たすように決定される。

$$P(Q(t), t) = \alpha T(t), \quad t_1 \leq t \leq t_2$$

ここに  $T(t)$  はトリップ所要時間であり、(2-9)式において定式化されている。

一方、最適な道路利用とは、時刻  $t_1$  から  $t_2$  までの時間帯の社会的余剰の和を最大化することによって達成される。したがって目的関数は次のように定式化される。

$$V = \int_{t_1}^{t_2} [B(t) - \alpha Q(t) T(t)] dt \quad (2-13)$$

ここに  $[\ ]$  内の第 1 項  $B(t)$  は時刻  $t$  における道路利用の社会的総便益であり、第 2 項の  $\alpha Q(t) T(t)$  は総トリップ費用である。 $B(t)$  は次の式により表される。

$$B(t) = \int_0^{Q(t)} P(q, t) dq \quad (2-14)$$

最適制御問題として定式化する。この問題における制御変数は各時刻に流入するトリップ数  $Q(t)$  であり、状態変数は各時刻における渋滞長  $J(t)$  である。状態方程式は次のように記述される。

---

<sup>5</sup> 同様の需要関数は、Verhoef(2001)、桑原(2002)においても採用されているが、このような定式化は当該時刻にトリップを行うか否かという選択のみを考慮しているという点で制約的である。他の時刻におけるトリップ費用に依存して、出発時刻間の代替が行われることを考慮したモデルは次の第 3 章において扱われる。

$$J(t) = -G(t) = \begin{cases} -\frac{W_b - Q(t)}{K_J(W_b) - \frac{W_b}{V_N(Q(t))}}, & \text{if } J(t) > 0, \text{ or } Q(t) \geq W_b \\ 0, & \text{if } J(t) = 0, \text{ and } Q(t) < W_b \end{cases} \quad (2-15a)$$

$$(2-15b)$$

式(2-15a)は式(2-12)に基づいており、(2-15b)は、渋滞長が非負であることを考慮したものである。また次のような渋滞長の非負条件がこの問題の制約条件式として含まれる。

$$J(t) \geq 0 \quad (2-16)$$

最大原理を適用して、上の問題の最適条件を導出する（導出過程の詳細は付論 2-C を参照されたい）。最適条件は交通状態に依存して異なる形になる。

まず渋滞が存在しない場合（ $J(t)=0$ ）は次の形になる。

$$P(Q(t), t) = \alpha T(t) + E_s(Q(t)) \quad (2-17)$$

ここに  $E_s(Q(t)) = \alpha Q(t) \frac{\partial T(t)}{\partial V_N} \frac{dV_N}{dQ(t)}$ 。上の式の右辺第 1 項は私的トリップ費用で

あり、第 2 項の  $E_s(Q(t))$  は非渋滞状態における交通量の限界的増加が、速度を低下させることを通じて同じ時刻に道路に流入したすべての車のトリップ費用を増加させる効果である。すなわちこれは静学モデルにおける混雑の外部効果と同じものであり、(2-17)式の右辺全体は、渋滞の生じない場合の社会的限界費用と解釈できる。したがって(2-17)式は、静学モデルにおける社会的最適の条件とまったく同じである。

一方、交通渋滞が存在する場合（ $J(t) > 0$ ）の最適条件は次の通りである。

$$P(Q(t), t) = \alpha T(t) + E_s(Q(t)) + E_d(t) \quad (2-18)$$

$$\text{ここに } E_d(t) = \int_t^{t_2} \alpha Q(u) \left\{ \frac{1}{V_N(W_b)} - \frac{1}{V_N(Q(u))} \right\} \frac{dJ(u)}{dQ(t)} du \quad (2-19)$$

(2-19)式右辺の被積分項内の  $\{ \}$  は、渋滞列内と非渋滞区間をそれぞれ単位距離走行するために要する時間の差なので、これは渋滞長一単位あたりの遅れを表している。そして  $\frac{\partial J(u)}{\partial Q(t)}$  は、時刻  $t$  における交通量の増加がそれ以後の時刻  $u$

における渋滞長を長くさせる効果である。したがって被積分関数は時刻  $t$  における一台の交通量増加が、その際に形成される渋滞列をより長くすることを通

じて、 $t$ 以降に流入するすべての車に、より長い渋滞走行をさせる効果と解釈できる。したがって  $E_d(t)$  を 動学的外部効果(dynamic externality)と呼ぶことにす

る。これと対応させるため、 $E_s(Q(t))$  を静学的外部効果と呼ぶ。

(2-18)式の右辺は、渋滞が存在する場合の社会的限界費用と解釈できる<sup>6</sup>。第2項の  $E_s(Q(t))$  は  $Q(t)=W_a$  のとき無限大になるので、この点は伝統的な静学モデルによる社会的限界費用と同様の性質である。しかし  $W_b < Q(t) < W_a$  の範囲では、渋滞が発生するが、(2-18)式の右辺は有限になる。このとき需要の水準が大きければ、最適な道路利用のもとでも交通渋滞が起きる可能性がある<sup>7</sup>。

最適な道路利用を分権的に達成するためには混雑料金を課する必要がある。混雑料金のもとでの利用者均衡の条件は以下の通りである。

$$P(Q(t), t) = \alpha T(t) + \tau(t), \quad t_1 \leq t \leq t_2$$

最適条件(2-17)と(2-18)を上式の式と対応させることにより、最適な混雑料金は次のようになる。

$$\tau(t) = \begin{cases} E_s(Q(t)), & \text{if } J(t) = 0 \\ E_s(Q(t)) + E_d(t), & \text{if } J(t) > 0 \end{cases} \quad (2-20a)$$

$$(2-20b)$$

渋滞が存在するときに最適な道路利用を達成するためには、静学的外部効果と動学的外部効果の和に等しい混雑料金を徴収する必要がある。動学的外部効果は、時刻が早いほど大きな値となる<sup>8</sup>。早い時刻に道路区間に流入して渋滞の形成に貢献すると、その後より多くの車に動学的外部効果を与えることになるためである。最適な混雑料金は、早い時刻に出発するトリップにより高い料金を課することによって動学的外部効果を内部化するのである。

## 2-5 おわりに

<sup>6</sup> 桑原(2002)の示した「動学的限界費用」は(2-18)式の右辺と同じものである。彼のモデルはボトルネックでの待ち行列のみを考慮しているので、第2項の  $E_s(Q(t))$  は存在せず、 $E_d(t)$  に相当する項も(2-19)式とは異なった形であるが、意味するところは同じである。

<sup>7</sup> Mun (1994)は、数値例によって最適のもとで渋滞が生じることを示した。

<sup>8</sup> このことは(2-19)式の  $E_d(t)$  を時間に関して微分すると負になることからわかる。



本章では、衝撃波の理論により交通渋滞の発生メカニズムをモデル化するとともに、交通渋滞が存在するときの、最適な道路利用の条件を導いた。ここで得られた結果は次の通り。

(1)トリップに関して定義された走行費用関数は流入交通量の単調増加関数である。

(2)最適な道路利用を達成するためには、動学的外部効果を考慮した混雑料金を徴収する必要がある。

(3)最適な道路利用のもとでも、交通渋滞が生じる可能性がある。

最後の結果は、本章における交通需要関数の仮定に依存する。ここでは各時刻のトリップ需要がその時刻のトリップ費用のみに依存すると仮定した。本章では、伝統的アプローチと比較可能な枠組みで交通渋滞の理論を展開することによって、その特性を明らかにすることをねらっていたので、時刻間の代替を無視した。次の章では、個人がすべての時刻のトリップ費用を考慮して出発時刻を選択するという対照的な仮定のもとで分析する。その場合、最適な道路利用のもとで交通渋滞は生じない。

本研究で示したような、動学的外部性を考慮した混雑料金を実際に徴収することは容易なことではない。なぜなら、(2-20b)式の右辺第2項には料金を徴収する時刻よりも後の交通量に関する情報が必要であり、これを正確に知ることには困難と思われる。不完全な情報にもとづいて計算された料金を徴収されることには、道路利用者の同意も得られ難いだろう。しかし日々繰り返される交通量の時間変動には一定の傾向も見られるので、それをもとに時間帯別交通量の予測精度が向上されるのであれば上述の困難はある程度克服可能である。

## 付論 2-A: 「超混雑」に関する議論の総括

図 2-A は、「超混雑」の議論において用いられる道路の走行費用と需要曲線を描いている。図において走行費用曲線は X-Y-Z のように反転している。そしてその反転した部分 Y-Z に相当する状態が「超混雑」と呼ばれている。

まずは、図 2-A のような費用曲線がいかにして描かれたかについて述べておく。道路の走行費用は所要時間に比例し、所要時間は走行した距離を速度で除したものと定義される。この定義にしたがい、図 2-1(b)における交通量－速度関係を交通量－走行時間(費用)関係に変換すれば、確かに図 2-A における X-Y-Z のように反転した走行費用曲線が描ける。しかし交通量－速度関係は、2-2 で述べたように、道路上のある地点において成立するものであり、より長い道路区間に対しては適用できない。

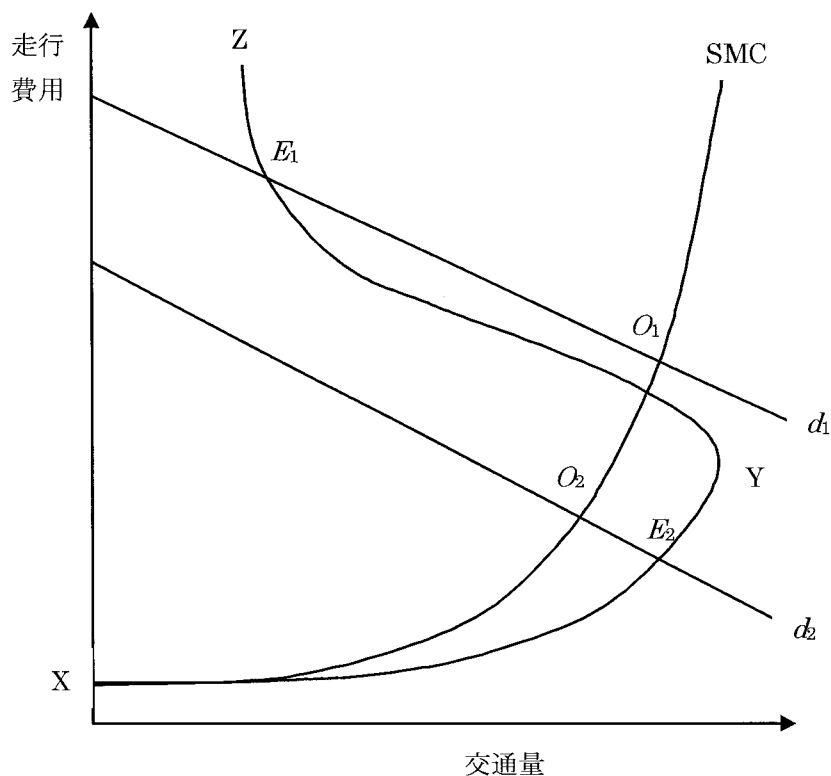


図 2-A 「超混雑」の理論における均衡と最適

さて図 2-A では、 $d_1$ や $d_2$ のように需要曲線を描き、費用曲線との交点（図の点  $E_1$ や $E_2$ ）において均衡交通量が決まるとしている。ここで点  $E_1$ では均衡において「超混雑」が生じるとされている。社会的限界費用は SMC のように描かれ、需要曲線との交点（図の点  $O_1$ や $O_2$ ）に相当する交通量が最適であるとして

いる。そしてそのような最適解を達成するためには SMC と走行費用（＝私的費用）との差に等しい混雑料金を徴収することを主張する。社会的限界費用曲

線は道路の交通容量（図 2-A の点 Y に相当する交通量）に近づくにつれ無限大に発散する。したがって、需要曲線がいかなる高水準になろうとも、最適において「超混雑」の存在は許されない。これは、「超混雑」の生ずる場合、同量の交通をより低い費用で処理できるためであると解釈されている。

以上の理論における費用曲線と需要曲線の定義には不整合がある。このことは、「超混雑」の生じる場合、特に問題になる。それは図 2-A における縦軸の費用の解釈である。需要者側からみれば、縦軸の費用は道路区間を走破すること、すなわちトリップのために要する費用と解釈すべきである。トリップとは、空間的に離れた二つの地点間の移動である。したがってトリップを行うかどうかの意志決定、すなわちトリップ需要は、出発地から目的地までの費用を考慮して行われるはずである。一方、図 2-A における費用曲線は、上述したように、道路上の一地点でのみ成り立つ交通量－速度関係にもとづいて描かれたものである。これより明らかなように、従来の理論における需要曲線と費用曲線は、本来、同一平面上に描くことはできないのである。本文の 2-3 で示したように一地点における関係ではなく、トリップに関して走行費用曲線を描くと、渋滞が起きても、図 2-A のような反転部分を持たない。したがって渋滞の存在する場合、点  $E_1$  のように均衡解が求められるとすることは正しくない。

図 2-A のように反転する費用曲線を想定する経済学者の多くは、「超混雑」（交通渋滞）の状態がなぜ起きるかについて深く考察することなく分析を行っているようである。渋滞は、図 2-3 に示すように道路区間の途中に交通容量の低いボトルネックが存在し、上流からの交通量がボトルネックの容量  $W_b$  を上回るときに生ずるものである。このときボトルネックを通過できなかった車が待ち行列を形成し、これが上流方向に伸びるが、この待ち行列の内部における交通流の状態が渋滞に相当する。

従来の「超混雑」の理論ではボトルネックを明示的に考慮せず、単一の交通量－費用関係に基づいているが、これは均一な道路区間を対象に渋滞の分析を行っていることを意味する。実際には、渋滞は均一な道路区間では生じない。

均一な道路区間では、流入交通量がその道路の交通容量を下回る限り、それらは渋滞することなく一定時間後に下流端から流出する。容量を超える交通量が

流入しようとした場合は、当該道路区間の中ではなく、道路に入る直前で渋滞列が形成され、上流に伸びるので当該区間にはやはり渋滞は生じない。何らかの原因により、道路区間の途中で渋滞に該当するほど高い密度の交通流の状態になったとしても、それは間もなく解消される。なぜなら、そのような箇所の交通流の速度は低くなるが、その箇所の前方にはそれより密度が低く速度が高い交通流があるので、それら二つの交通流の間には車の存在しない空間が生じる。このとき一時的に生じた渋滞流は前方の空間を詰めるよう加速することによって密度を低下させることができるので、やがて渋滞は解消する。最近、Verhoef (2001)は、追従モデルを用いて上述のプロセスを厳密に記述することにより、均一な道路区間において渋滞状態が持続し得ないことを示している。

渋滞はボトルネックの存在抜きには考えられない。その意味で、Walters (1961)がここでいう渋滞をボトルネック混雑と呼んだのは正しいが、彼の分析内容はそのような呼称と対応していなかった。

伝統的アプローチは、基本的に静学的分析であり、交通流の定常性を想定している。しかしこの想定は、渋滞の問題を取り扱うためには不適當である。たとえば、定常的にボトルネック容量を越える一定の交通量が流入した場合、渋滞列はいつまでも伸び続けるので、同じ流入交通量に対しても、流入した時刻によって渋滞列の長さは異なり、したがって走行費用も異なる。渋滞を考慮するためには、動学的分析が必要である。

ただし流入交通量が容量を下回り、渋滞が生じない場合は、定常性を仮定しても問題はない。またこの場合は、道路区間が均一であれば上流からの交通量がそのまま終点から流出するので、断面交通量と速度の局所的関係を全区間に引き伸ばすことができ、図 2-A の  $E_2$  点のように均衡と最適を決めても定性的には間違いではない。すなわち伝統的アプローチは、渋滞の生じない限りにおいて正しい結果を与える。

ところで Else(1981)は、需要曲線及び費用曲線を交通密度について定義するという、代替的アプローチを提案した。速度は交通密度の単調減少関数である

ことから交通費用を密度の増加関数とし、交通量で定義した費用曲線が反転する問題を回避しようと試みたのである。同様の主張は、Evans(1992)、Kawashima(1988)、松澤(1992)においても見られる。密度が大きくなれば速度が低下するので費用が増加するという関係は正しい。しかし密度に関して定義された費用曲線を用いて均衡を求めるためには、需要関数も密度に関して定義する必要がある。しかしストック変数である密度を道路利用者の意志決定変数とするような行動理論は経済学に存在しない。経済分析における意思決定変数は、消費や生産のように単位期間あたりの数量を表すフロー変数で定義すべきであろう。意思決定変数が Else 自身の主張する"completed journey"であるためには、それは交通密度ではなく、道路の始点から終点までの「トリップ」について定義すべきである。なお定常状態であれば、トリップは交通量の定義と一致する。この Else の議論をめぐって、様々な論争が行なわれたが、それらはいずれも均一な道路区間を対象とした静的分析の枠内にとどまったものなので、かえって議論を混乱させただけの不毛なものであった。

以上より、「超混雑」に関するこれまでの議論では、動的な現象である渋滞を伝統的な静的モデルにもとづいて議論したこと、ボトルネックの存在を考慮せず均一な道路区間において渋滞が生じると考えていたこと、そしてトリップ費用と局所的な交通量－速度関係（あるいは密度－速度関係）を混同したことが誤まりの原因である。

以上の議論とは別のところで、実は Vickrey (1969)以来、ボトルネック混雑に関する経済学的研究が行われている。このモデルは、ボトルネックを通過するための待ち時間に基づくものであり、ドライバーの出発時刻選択を組み合わせるピークロード料金の分析が行われている。ボトルネック混雑の基本モデルについては、次の章の 3-2 において解説される。経済学の文献では、このボトルネックモデルが、先に述べた交通量－速度関係に基づく混雑理論と互いに無関係のものであるかのように紹介されているが、実はいずれも、本来、統一的な交通流理論の体系から一部分を切り出して簡略化したものである。Vickrey モデルは、現象の本質を損なうことなく、操作性の高い枠組みを構築した点で優れているが、交通流の取扱いは過度に単純化されている。そこでは車が出発地からボトルネック地点まで（他の車に影響されず）一定の速度で走行するも

のと仮定されている。このことは、ボトルネックを通過するための（待ち時間は考慮されているものの）待ち行列の物理的長さはゼロであることを意味する。

これは、あたかもボトルネック地点に車を駐車する広いスペースがあり、各車は自分の番がくるまでそこで車を止めて待つことができるような状況を想定することになる。Arnottら(1990a)においても、今後の課題の一つとして渋滞現象を明示的に取り扱うべきであると述べている。

## 付論 2-B：交通流理論の補足

### (2-1)の導出：

密度  $K$ 、速度  $V$ 、交通量  $Q$  の均一な交通流がある地点  $x$  を流れているものと想定しよう。この地点から上流側に  $V$  離れた地点と  $x$  の間に存在する車の台数は  $KV$  に等しい。単位時間の間にこの  $KV$  台の車がすべて地点  $x$  を通過するが、それは交通量の定義より  $Q$  そのものである。

交通量－密度関係について：

式(2-2)を  $K$  で微分すると

$$\frac{dQ}{dK} = V + K \frac{dV}{dK}$$

右辺第1項は、速度一定のまま密度が増加したとき通過交通量が増加する効果を表している。第2項は式(2-1)より  $f'(K) < 0$  なので負の値である。密度が増加すると速度が低下するのでその地点を走り抜ける台数が少なくなる、すなわち通過交通量が減少することを表している。密度が低い状態では上式右辺第1項

の効果が支配的なので  $\frac{dQ}{dK}$  は正になる。逆に密度が高い場合  $\frac{dQ}{dK}$  は負になる。密

度がゼロのとき、(車が存在しないので)交通量もゼロである。一方、密度が非常に高い場合（前の車との間隔がゼロに近いとき）車は身動きできず速度はゼロになる。このときもやはり交通量はゼロである。また通過交通量が最大となる密度  $K_m$  が存在するが、そのような最大交通量が交通容量である。以上より  $Q-K$  曲線が図 2-1(c)のような形になることがわかる。図 2-1(b)の  $Q-V$  曲線につ

いても同様である。

### (2-5)式の導出：

図 2-2 に示すように、時刻  $t$  に地点  $x$  にあった不連続点が  $G$  の速度で運動しているものとする。単位時間経過後、すなわち時刻  $t+1$  において不連続点は  $x+G$  の位置にあるはずである。 $x$  と  $x+G$  の間の区間における  $t$  から  $t+1$  までの交通状態変化を考えよう。この区間には  $Q_U$  の交通量が流入し  $Q_D$  の交通量が流出するので、単位時間当たり  $Q_U - Q_D$  台の車が溜まる。一方、長さ  $G$  の区間に存在する車の数は時刻  $t$  の  $K_D G$  台から時刻  $t+1$  には  $K_U G$  台へと変化しているので、その間の変化は  $K_U G - K_D G$  である。したがって  $Q_U - Q_D = K_U G - K_D G$  から (2-3) 式が得られる。

もう一つの導出法を紹介する。いま道路の横で観察者が常に不連続点と並んで動くことができるものと想定しよう。このとき観察者から見た車の相対速度は絶対速度マイナス  $G$  になる。観察者から見ると、上流側で  $K_U(V_U - G)$ 、下流側で  $K_D(V_D - G)$  の交通量が流れている。そしてこれらはいずれも観察者の前を通り過ぎる車の台数なので等しくなるはずである。したがって  $K_U(V_U - G) = K_D(V_D - G)$  が成り立つ。この式を  $G$  について解き、 $Q_U = K_U V_U$ 、 $Q_D = K_D V_D$  の関係を用いれば (2-5) 式が得られる。

### 付論 2-C：最適な道路利用の条件

最大原理によれば、この問題の最適解は次のハミルトニアンを最大化する。

$$\mathcal{H}(t) = B(t) - \alpha Q(t)T(t) - \Omega(t)G(t) \quad (2C-1)$$

ここに  $\Omega(t)$  は状態方程式 (2-15) に関する随伴変数 (costate variable) である。各時刻毎の制約条件が含まれるので、次のようにラグランジアンを定義する。

$$\mathcal{L}(t) = \mathcal{H}(t) + \eta(t)J(t) \quad (2C-2)$$

ここに  $\eta(t)$  は制約条件式 (2-16) に関するラグランジュ乗数である。

最適条件は次のように書ける。

$$P(Q(t), t) - \alpha T(t) - \alpha Q(t) \frac{\partial T(t)}{\partial V_N} \frac{dV_N}{dQ(t)} - \Omega(t) \frac{dG(t)}{dQ(t)} = 0 \quad (2C-3)$$

$$\eta(t)J(t)=0, \quad \eta(t) \geq 0 \quad (2C-4)$$

また随伴変数  $\Omega(t)$  は次の式を満たす。

$$\begin{aligned} \frac{\partial \mathcal{L}}{\partial J(t)} &= -\dot{\Omega}(t) \\ &= -\alpha Q(t) \left\{ \frac{1}{V_N(W_b)} - \frac{1}{V_N(Q(t))} \right\} + \eta(t) \end{aligned} \quad (2C-5)$$

時間帯の終端時刻  $t_2$  は固定されているので、横断性条件は次のようになる。

$$\Omega(t_2)=0 \quad (2C-6)$$

したがって式(2C-5)を時刻  $t$  から  $t_2$  まで積分し、横断性条件(2C-6)を考慮すると次の式を得る。

$$\Omega(t) = - \int_t^{t_2} [\alpha Q(u) \left\{ \frac{1}{V_J(W_b)} - \frac{1}{V_N(Q(u))} \right\} + \eta(u)] du \quad (2C-7)$$

最適条件は、交通状態によって異なる形になる。

交通渋滞が存在しない場合 ( $J(t)=0$ )、状態方程式は(2-15b)のケースが該当するので  $\frac{dG}{dQ}=0$  となる。このとき(2C-3)は下記の形になる。

$$P(Q(t), t) = \alpha T(t) + \alpha Q(t) \frac{\partial T(t)}{\partial V_N} \frac{dV_N}{dQ(t)} \quad (2C-8)$$

一方、交通渋滞が存在する場合、 $J(t)>0$  なので  $\eta(t)=0$  になる。また状態方程式は式(2-15a)のケースが該当するが、このとき(2-8b)と同様にして  $\frac{dG(t)}{dQ(t)} = -\frac{dJ(u)}{dQ(t)}$  が成り立つ。この関係と式(2C-7)を式(2C-3)に代入すると、次が得られる。

$$P(Q(t), t) = \alpha T(t) + \alpha Q(t) \frac{\partial T(t)}{\partial V_N} \frac{dV_N}{dQ(t)} + \int_t^{t_2} \alpha Q(u) \left\{ \frac{1}{V_J(W_b)} - \frac{1}{V_N(Q(u))} \right\} \frac{dJ(u)}{dQ(t)} du \quad (2C-9)$$

式(2C-8)と(2C-9)は、それぞれ、本文における式(2-17)と(2-18)に対応している。



### 第3章 通勤ラッシュアワーにおけるピークロード問題\*

#### 3-1 はじめに

朝の出勤ラッシュアワーにおける交通渋滞は、多くの都市で共通に見られる代表的な交通問題である。朝7時台から徐々に混雑が始まり、8時30分から9時にかけて最も激しくなった後、9時を過ぎて解消に向かうというのが、毎日のように繰り返される典型的なパターンである。このような道路利用の時間的変動は資源配分上どのような点で問題なのか、またこれに対しどのような政策をとるべきか、などの問いに答えることが本章の目的である。

ラッシュアワーにおける混雑の時間変動は、人々のトリップ時刻選択の結果である。都心部にあるほとんどの企業は朝の9時に業務を開始するので、その時刻ちょうどのにオフィスに到着することがすべての労働者にとって望ましい。しかし交通容量の制約があるのでそのような交通パターンは実現不可能である。したがって一部の労働者は、始業時刻よりも早くオフィスに到着することになる。オフィスに到着してもすぐに仕事を始められるわけではないので、始業時刻まで待機することになるが、この待機時間の機会費用をスケジューリング費用と呼ぶ。個々の労働者は、早めにオフィスに着くよう出発すると、比較的交通混雑による遅れが少なく済むが、オフィスにおけるスケジューリング費用が大きくなるというトレードオフに直面する。

本章では、朝のラッシュアワーにおいて、各労働者が混雑とスケジューリング費用とのトレードオフを考慮して出発時刻を選択する行動を定式化し、時刻別道路利用の均衡解とその社会的効率性を分析する。

以下、3-2ではまず出勤ラッシュアワーにおける通勤者の出発時刻選択のモデルを提示し、均衡および最適な出発時刻分布を求める問題を定式化する。3-3では、ラッシュアワーの問題について従来から研究されてきた代表的なモデ

---

\* 本章は、Mun(1999)およびそれを改訂した文(2001)に基づいている。改訂に際しては桑原雅夫教授より重要なご指摘をいただき、モデルの再定式化と数値計算をやり直した。また Ken Small, Robin Lindsey の両教授からも貴重なコメントをいただいた。

ル、すなわち Henderson(1981)によるフロー混雑モデル、および Vickrey(1969) - Arnott, dePalma, Lindsey (1990a)によるボトルネックモデルにもとづく分析を紹介する。そして 3-4 では、第 2 章で定式化した交通渋滞の動的モデルにもとづいて同じ問題を分析し、このモデルが従来のモデルを特殊ケースとして含むという意味で一般性の高いことを示す。3-5 では、数値シミュレーションを通じて、均衡および最適な道路利用のパターンと経済厚生の関係について分析する。

### 3-2 通勤ラッシュアワーにおける均衡と最適

#### 3-2-1 出発時刻選択と均衡

毎朝、 $N$  人の労働者が郊外の住宅地から CBD にある勤務先まで車で通勤するものとする。通勤費用は、トリップ時間費用とスケジューリング費用および道路料金（課される場合）から成る。トリップ時間費用は、住宅地から勤務先までのトリップのため道路を走行する時間に関する機会費用である。スケジューリング費用は、始業時刻よりも職場に早く着いたり、遅く着くことによって発生する。前者の場合は始業時刻までの待ち時間による機会費用、後者の場合は遅刻によるペナルティである。時刻  $t$  に自宅を出発したドライバーの通勤費用  $C(t)$  は次のように表される。

$$C(t) = \alpha T(t) + \beta(\hat{t} - t - T(t)) + \tau(t), \quad \text{if } t + T(t) \leq \hat{t} \quad (3-1a)$$

$$C(t) = \alpha T(t) + \gamma(t + T(t) - \hat{t}) + \tau(t), \quad \text{if } t + T(t) > \hat{t} \quad (3-1b)$$

ここに  $T(t)$  はトリップに要する時間、 $\tau(t)$  は通行料金である。そして  $\alpha$  は走行時間の金銭的評価値、 $\beta, \gamma$  はそれぞれ、早着による待機時間の価値、遅刻時間当たりペナルティである。なお  $\beta < \alpha < \gamma$  を仮定する<sup>1</sup>。また  $\hat{t}$  は始業時刻である。本章では、CBD にある全企業の始業時刻が同一であると仮定する。 $t + T(t)$  は時

---

<sup>1</sup>  $\beta < \alpha$  は、オフィスにいれば車の中で過ごすよりも何かしら有用なことが行えるということを考慮すると妥当である。また遅刻によるペナルティは旅行時間より高い、すなわち  $\alpha < \gamma$  も自然な仮定である。以上の関係は、Small (1982)による実証研究でも確認されている。

刻  $t$  に出発した人が職場に着く時刻なので、(3-1a)は早着する場合の通勤費用、(3-1b)は遅刻する場合の通勤費用である。

各通勤者は通勤費用を最小化するように出発時刻を選択する。労働者は始業時刻ちょうどに職場に着けばスケジューリング費用はかからない。しかしすべての労働者が始業時刻ちょうどに着くことは不可能なので、大半の者は始業時刻の前か後に着くことになる。均衡は、どの個人も出発時刻を変更する誘因を持たなくなるような状態と定義される。そのような状態は、出発時刻に関わらず通勤費用が一定であるとき達成される。したがって均衡条件は次のように書ける。

$$\alpha T(t) + \beta(\hat{t} - t - T(t)) + \tau(t) = C^*, \quad \text{if } t_1 \leq t \leq \hat{t} - T(t) \quad (3-2a)$$

$$\alpha T(t) + \gamma(t + T(t) - \hat{t}) + \tau(t) = C^*, \quad \text{if } \hat{t} - T(t) < t \leq t_2 \quad (3-2b)$$

$$\int_{t_1}^{t_2} Q(t) dt = N \quad (3-2c)$$

ここに  $t_1, t_2$  は、それぞれ、 $N$  人のドライバーの内最も早く出る者、最も遅く出る者の出発時刻である。すなわちラッシュアワーの開始時刻、終了時刻である。また  $Q(t)$  は時刻  $t$  に住宅地を出発する労働者の数であり、それは道路の入り口における交通量に等しい。 $Q(t)$  の単位は (人/分) であり、出発率とも呼ばれる。そして  $C^*$  は、均衡時に各ドライバー間で等しくなる通勤費用である。

(3-2c)式の左辺はラッシュアワーの間に出発した労働者の総数である。

いま道路の通行料金が課されない、すなわち  $\tau(t) = 0$  であるものとする。そして(3-2a)、(3-2b)式の両辺を時間に関して微分すると、次の式が得られる。

$$\dot{T}(t) = \begin{cases} \frac{\beta}{\alpha - \beta}, & \text{if } t_1 \leq t \leq \hat{t} - T(t) \\ -\frac{\gamma}{\alpha + \gamma}, & \text{if } \hat{t} - T(t) < t \leq t_2 \end{cases} \quad (3-3)$$

これは無料金均衡の条件式である。 $\dot{T}(t)$  はトリップ時間の時刻に関する導関数であるが、その具体的な形は、交通混雑のモデルをどのように定式化するかに依存する。

### 3-2-2 最適な道路利用

総トリップ数が与えられているので、社会的に最適な道路利用はラッシュアワー中の総通勤費用を最小化することである。したがって目的関数は次のように書ける。

$$V = \int_{t_1}^{\tilde{t}} C^1(t)Q(t)dt + \int_{\tilde{t}}^{t_2} C^2(t)Q(t)dt \quad (3-4a)$$

$$\text{ここに } C^1(t) = \alpha T(t) + \beta(\hat{t} - t - T(t)) \quad (3-4b)$$

$$C^2(t) = \alpha T(t) + \gamma(t + T(t) - \hat{t}) \quad (3-4c)$$

上式における  $C^1(t)$ ,  $C^2(t)$  は、それぞれ始業時刻よりも早く着く者、遅く着く者の通勤費用である。また  $\tilde{t}$  は、ちょうど始業時刻に着く者が自宅を出発する時刻である。すなわち  $\tilde{t} + T(\tilde{t}) = \hat{t}$  が成り立つ。解くべき問題は、(3-2c)式の制約のもとで総通勤費用を最小化するような交通量の時間配分  $Q(t)$  を求めることである。

### 3-3 交通混雑のモデルとピークロード問題

朝のラッシュアワーにおけるピークロード問題については、混雑のモデル化に際して、大別すると二通りのアプローチがなされており、それらは混雑料金の効果に対して異なった結論を導いている。Henderson(1981)は、道路の走行費用が交通量の単調増加関数であると仮定したモデルに基づいて、この問題を分析した。彼は、混雑料金を導入した場合、無料金均衡に比べ社会的最適解におけるラッシュアワーの長さが長くなる、すなわち出発時刻分布がより分散することを示した。その結果、混雑料金を課すことによってドライバーの厚生は悪化する。一方、Vickrey (1969)及び Arnott, de Palma and Lindsey (1990a)らは、ボトルネックにおける待ち行列として混雑をモデル化している。このモデルでは、無料金均衡と社会的最適解におけるラッシュアワーの長さは等しくなり、ドライバーの厚生、すなわちドライバーの負う私的費用は混雑料金を課しても変化しないという結果が得られる。

上の二通りのモデルによる分析結果は大きく異なっている。以下では、これ

らについて詳細に検討することにする<sup>2</sup>。

### 3-3-1 Henderson のフロー混雑モデル

Henderson(1981)は、トリップ時間が交通量の単調増加関数であると仮定してピークロード問題を分析した。すなわちトリップ時間を次のように定式化する。

$$T(t) = h(Q(t)), \quad h'(1) = 0, \quad h'(Q) > 0, \quad h''(Q) \geq 0$$

上の仮定にしたがえば、時刻の進行にともなうトリップ時間の推移は  $\dot{T}(t) = h'(Q(t))$  となるが、これを無料金均衡の条件である(3-3)式に適用すると、次が得られる<sup>3</sup>。

$$\dot{Q}(t) = \frac{\beta}{(\alpha - \beta)h'} > 0, \quad \text{if } t_1^* \leq t \leq \hat{t} - T(t) \quad (3-5a)$$

$$\dot{Q}(t) = -\frac{\gamma}{(\alpha + \gamma)h'} < 0, \quad \text{if } \hat{t} - T(t) < t \leq t_2^* \quad (3-5b)$$

ここに  $t_1^*, t_2^*$  は、それぞれ、均衡におけるラッシュアワーの開始時刻と終了時刻である。上の式より早着時間帯には交通量が時間とともに増加し、遅着時間帯

---

<sup>2</sup> 同様の枠組みで通勤ラッシュアワーを取り扱った研究は、Mahmassani and Herman(1984)、Newell(1988)、Chu(1993,1995)、坂下(1994)らによっても行われている。Mahmassani and Herman(1984)は、速度－密度関係にもとづいて定義された走行費用関数を用いたモデルを定式化している。このモデルは、均一な道路区間を対象としているにも関わらず、均衡において渋滞が生じるとしている。しかし Newell(1988)も指摘したように、ボトルネックのない道路区間では渋滞は起こり得ない。またこのようなモデルに基づく分析は、後で出発した車が早く目的地に到着するという奇妙な結果を導くことが、Chu(1993)によって指摘されている。Newell(1988)は、流体理論に沿って厳密に定式化されたモデルに基づいて利用者均衡および社会的に最適な出発時刻分布を導いている。しかし均一な道路区間を対象としているので、渋滞に関する分析は行われていない。坂下(1994)は、Mahmassani and Herman とほぼ同様のモデルに基づいて最適な出発時刻分布を導いている。その結果、最適な交通量は時間を通じて一定であり、それは道路区間の容量に等しいという結果を得ている。さらに Chu(1995)は、Henderson のモデルにおける走行費用を到着地の交通量の関数として再定義し、同様の分析を行った。しかし交通流のモデルとしてそのような費用関数の正当性は疑問である。いずれにせよ、以上のモデルは、ボトルネックのない均一な道路区間を対象としており、渋滞現象を明示的に分析することはできない。

<sup>3</sup> Henderson(1981)におけるスケジュール費用は、本章の 3-2 で定式化したものとは異なる。彼はオフィスへの希望到着時刻とのかい離ではなく、自宅での希望出発時刻とのかい離についてスケジュールリング費用を定義している。また、スケジュールリング費用関数が希望出発時刻を中心にして対称的な形を仮定している。しかしこのような違いは、結果に本質的な影響を与えないので、比較が容易になるように 3-2 の定義に沿って定式化している。

には減少する。上の式をさらにもう一度時間について微分すると、早着・遅着のいずれの場合でも  $\dot{Q}(t) < 0$  となることがわかる。したがって早着時間帯において交通量の増加率は時刻とともに逓減し、遅着時間帯では減少率が逓増する。

一方、最適な道路利用の条件は、上の  $T(t)$  を 3-2-2 で定式化した問題に適用することにより求められる。すなわち

$$(\alpha - \beta)\{h + h'Q(t)\} + \beta(\hat{t} - t) = C^0, \quad \text{if } t_1^0 \leq t \leq \hat{t} - T(t) \quad (3-6a)$$

$$(\alpha + \gamma)\{h + h'Q(t)\} + \gamma(t - \hat{t}) = C^0, \quad \text{if } \hat{t} - T(t) < t \leq t_2^0 \quad (3-6b)$$

ここに  $t_1^0, t_2^0$  は、それぞれ、最適なラッシュアワーの開始時刻と終了時刻である。無料金均衡の場合と同様に(3-6)式の両辺を時間で微分すると、次が得られる。

$$\dot{Q}(t) = \frac{\beta}{(\alpha - \beta)(2h' + h''Q(t))} > 0, \quad \text{if } t_1^0 \leq t \leq \hat{t} - T(t) \quad (3-7a)$$

$$\dot{Q}(t) = -\frac{\gamma}{(\alpha + \gamma)(2h' + h''Q(t))} < 0, \quad \text{if } \hat{t} - T(t) < t \leq t_2^0 \quad (3-7b)$$

同様にして、上の式についても  $\dot{Q}(t) < 0$  となる。したがって出発率関数  $Q(t)$  の形状は無料金均衡と同様である。

このような最適解を分権的に達成するための混雑料金は、(3-6)式を(3-2)式と対応させることにより、次のように求められる。

$$\tau(t) = \begin{cases} (\alpha - \beta)h'Q(t), & \text{if } t_1^0 \leq t \leq \hat{t} - T(t) \\ (\alpha + \gamma)h'Q(t), & \text{if } \hat{t} - T(t) < t \leq t_2^0 \end{cases} \quad (3-8)$$

上の式において  $h'Q(t)$  は時刻  $t$  に出発する労働者が一人増えることによりその時刻に道路を利用するすべての者が被る旅行時間の増加分である。最適な混雑料金はこのような混雑の外部効果に等しくなるよう設定する必要がある。なお最初に出発する通勤者にとっては  $\tau(t_1) = 0$  である。

図 3-1 には、以上の分析をふまえて無料金均衡および社会的最適のもとでの出発率の時間変動が描かれている。図では社会的最適のもとでは出発率曲線の勾配が無料金均衡のときよりも緩やかに描かれている。これは(3-7)式を(3-5)式と比較すると、社会的最適のもとでの  $\dot{Q}(t)$  の絶対値が無料金均衡のもとでのそれよりも、あらゆる時刻において小さくなるからである。この関係と、両ケースとも曲線の下側の面積が  $N$  に等しいことを考慮すると、社会的最適の出発分

布は無料金均衡の場合よりも前後に広がらねばならない。したがってラッシュアワーは社会的最適の方が早く始まり、遅くまで続く。すなわち  $t_1^o < t_1^*$ 、 $t_2^o > t_2^*$  である。このことは社会的最適のもとでのラッシュアワーが無料金均衡の場合よりも長いことを意味する。また図では  $\tilde{t}^* < \tilde{t}^o$  となっているが、これは  $Q(\tilde{t}^*) > Q(\tilde{t}^o)$  であることを考慮して、 $\tilde{t}^* + T(\tilde{t}^*) = \tilde{t}$  と  $\tilde{t}^o + T(\tilde{t}^o) = \hat{t}$  を比較すれば明らかである。

ラッシュアワーの長さは私的厚生水準と密接な関係がある。ラッシュアワーの開始時刻  $t_1$  において最初に住宅地を出発する者は他の車の影響をまったく受けないので自由走行速度でトリップを行うことができる。したがって(3-2)式と(3-6)式に  $\tau(t_1) = 0$ 、 $h'(1) = 0$  を適用すると、次の関係が得られる。

$$(\alpha - \beta)h(1) + \beta(\hat{t} - t_1^*) = C^*$$

$$(\alpha - \beta)h(1) + \beta(\hat{t} - t_1^o) = C^o$$

既に述べた  $t_1^o < t_1^*$  の関係を上の二式に適用して比較することにより、 $C^o > C^*$  となることがわかる。 $C^o$  は最適における料金込みの通勤費用なので、混雑料金を導入した場合の私的通勤費用は無料金均衡のもとでの費用よりも大きい。混雑料金の導入により利用者の私的厚生は低下するのである。この結果は第1章で示した標準的な静学モデルで得られた結果と同様である。





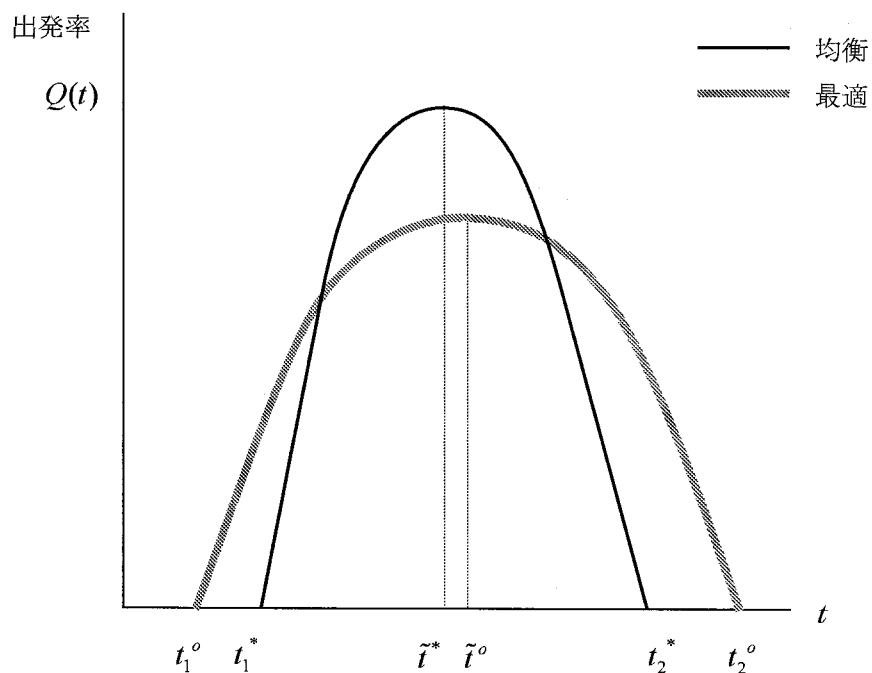


図 3-1 Henderson のモデルによる均衡と最適

Henderson のモデルは、本質的には静学的な混雑モデルに時間の次元を追加したものに過ぎず、真の意味では動学モデルとはいえない。また交通流の物理的法則をふまえて考察すれば、このモデルにおける均衡の存在可能性がきわめて限定されることが明らかになる。以下ではこの点について検討しよう。

静的モデルにおいては交通量  $Q$  に対して様々な解釈が可能であるが<sup>4</sup>、ここで対象とするように、連続時間のラッシュアワーの問題における  $Q(t)$  は、時刻  $t$  前後の非常に短い時間に流入する単位時間あたり車の台数（あるいは時刻  $t$  における瞬間的な流入率）と解釈するほかない。これは第 2 章で述べたような交通流理論における交通量の定義と一致する。このときトリップ時間が流入交通量の単調増加関数であるということは、図 2-1 の  $Q$ - $V$  曲線における上半分の関係のみを想定することを意味する。したがって Henderson モデルのトリップ所要時間を交通流理論にしたがって定義すると次のように書ける。

<sup>4</sup> たとえば一日の総交通量、ピーク交通量、あるいは定常的に流入する交通量など。

$$T(t) = \frac{L}{V_N(Q(t))}$$

そしてトリップ時間の時間的推移は

$$\dot{T}(t) = -\frac{L}{\{V_N(Q(t))\}^2} \frac{dV_N}{dQ(t)} \dot{Q}(t) \quad (3-9)$$

となる。

均衡条件(3-3)式によると、早着時間帯において  $T(t)$  は一定の率で増加し続けねばならない。ところが上の式により求められる  $T(t)$  には上限があり、それは流入交通量の上限  $W_a$  (道路区間の容量) に対する  $L/V_N(W_a)$  に等しい。総交通量  $N$  が大きい場合、式(3-2c)よりラッシュアワーが長くなるので、 $T(t)$  の増加する時間帯の途中でこの上限に達してしまう可能性がある。遅着時間帯においても同様である。このとき式(3-2c)を満たし、かつすべての出発時刻において通勤費用が等しくなるような均衡は存在しえない。すなわち Henderson のモデルでは無料金均衡の存在しないケースが広範に生じるのである。混雑水準が各時刻の交通量のみに依存して単調増加するというモデルは、所要時間の増加が主たる要因である道路混雑を表すモデルとしては不適切であるが、混雑による疲労や不快が主たる要因である公共交通機関の混雑には適用可能である<sup>5</sup>。

### 3-3-2 Vickrey 型のボトルネックモデル

このモデルは Vickrey(1969)において初めて定式化されたが、経済学者の間で広く知られるようになったのは、Arnott, de Palma and Lindsey (1990a)によって再検討がなされて以降である。以下の説明は、Arnott らの記述に基づくものである。

住宅地と CBD は一本の道路で結ばれており、道路には CBD の直前にボトルネックがあるものとする。車は自宅からボトルネック地点までを一定速度で走行することができる。したがってこの区間の走行時間は一定値であり、 $T_f$  と表記する。交通量がボトルネック容量  $W_b$  を超過する場合にはボトルネック後方に

<sup>5</sup> 奥村・小林・田中(1999)は鉄道混雑に対してそのようなモデルを適用している。

待ち行列が発生する。時刻  $t$  に出発した場合のトリップ所要時間  $T(t)$  は、次のように定義される。

$$T(t) = T_f + \frac{M(t)}{W_b}, \quad (3-10)$$

ここに  $M(t)$  は（車の台数で測った）待ち行列の長さである。したがって上の式の右辺第2項は待ち行列の中で過ごす時間を表す。

時刻  $t$  に出発した人が経験する待ち行列の長さは次のように求められる。

$$M(t) = \int_{t_q}^t [Q(s) - W_b] ds, \quad (3-11)$$

ここに、 $t_q$  は待ち行列が発生する時刻であり、 $Q(t)$  は時刻  $t$  に住宅地を出発するトリップ数である。(3-11)式を(3-10)式に代入して得られた式を時間  $t$  に関して微分することにより、下記のようにトリップ時間の時間推移が得られる。

$$\dot{T}(t) = \frac{\dot{M}(t)}{W_b} = \frac{Q(t) - W_b}{W_b} \quad (3-12)$$

この式を無料金均衡の条件式(3-3)に代入すると、各時刻の出発率が次のように求められる。

$$Q(t) = \frac{\alpha W_b}{\alpha - \beta}, \quad \text{if } t_1 \leq t \leq \tilde{t} \quad (3-13a)$$

$$Q(t) = \frac{\alpha W_b}{\alpha + \gamma}, \quad \text{if } \tilde{t} < t \leq t_2 \quad (3-13b)$$

ここに  $t_1$  は最初の通勤者の出発時刻、 $t_2$  は最後の通勤者の出発時刻である<sup>6</sup>。また  $\tilde{t}$  は始業時刻ちょうどに着く通勤者が自宅を出発する時刻であり、 $\tilde{t} + T(\tilde{t}) = \hat{t}$  を満たす。上の式からわかるように、早着時間帯においては  $Q(t) > W_b$  なので、待ち行列が形成される。時刻  $t_1$  に出発する最初の通勤者は待ち行列に遭わないため、通勤費用は次のようになる。

$$C(t_1) = (\alpha - \beta)T_f + \beta(\hat{t} - t_1). \quad (3-14)$$

均衡が達成されたとき、任意の出発時刻  $t$  において  $C(t) = C(t_1) = C^*$  が成り立つの

<sup>6</sup> 均衡において、 $t_1$  は式(3-11)の  $t_q$ （待ち行列が形成され始める時刻）と一致する。

で、 $t_1$ が求められれば、均衡通勤費用 $C^*$ が得られる。そのためには、下の方程式を $t_1, t_2, \tilde{t}$ について解かねばならない。

$$N = \int_{t_1}^{t_2} Q(t) dt \quad (3-15a)$$

$$\tilde{t} + T(\tilde{t}) = \hat{t} \quad (3-15b)$$

$$M(t_2) = 0 \quad (3-15c)$$

式(3-15a)は、 $t_1$ と $t_2$ の間に家を出た通勤者の合計が $N$ であることを意味し、式(3-15c)は、時刻 $t_2$ に出発（すなわち最後に出発）した者が待ち行列に遭わないことを求めている。 $M(t_2) > 0$ だと、出発時刻を遅らせることによって通勤時間を節約できるので、均衡とはならないからである<sup>7</sup>。

上の方程式を解くことにより次が得られる。

$$t_1 = \hat{t} - \frac{\gamma}{\beta + \gamma} \frac{N}{W_b} - T_f \quad (3-16a)$$

$$\tilde{t} = \hat{t} - \frac{\beta}{\alpha} \frac{\gamma}{\beta + \gamma} \frac{N}{W_b} - T_f \quad (3-16b)$$

$$t_2 = \hat{t} + \frac{\beta}{\beta + \gamma} \frac{N}{W_b} + T_f \quad (3-16c)$$

式(3-14)と(3-16a)より、次のように均衡通勤費が得られる。

$$C^* = \alpha T_f + \frac{\beta \gamma}{\beta + \gamma} \frac{N}{W_b} \quad (3-17)$$

次は社会的に最適な道路利用を、Arnottら(1990a)に倣ってヒューリスティックに導くことにする<sup>8</sup>。

まず、待ち行列はまったくの死重損失なので、待ち行列の発生を完全に防止

<sup>7</sup> 仮に $M(t_2) > 0$ としよう。ラッシュアワーの終了直後、 $t_2$ から $t_2 + dt$ の間は車が流入しないので、その間に待ち行列はボトルネック容量に等しい率で減少する。そこで $\dot{M}(t_2) = -W_b$ を(3-12)式に適用すると、 $\dot{T}(t_2) = -1$ となる。このとき $\dot{C}(t_2) = -\alpha < 0$ となるが、これは出発時刻を $t_2 + dt$ に遅らせることによって通勤費用が減少することを意味する。これは均衡の定義と矛盾する。

<sup>8</sup> 3-4-2で示すような最適制御理論を適用することによって、同様の解を厳密に導くことができる。

する必要がある。待ち行列があろうがなかろうがボトルネックを通過する台数はたかだか $W_b$ なので、待ち時間を減らしてもスケジューリング費用は不変だからである。したがって出発率は $W_b$ を超えてはならない。待ち行列が存在しないとき、総通勤費用は総スケジューリング費用＋一定値（ $=\alpha NT_f$ ）になるので、総スケジューリング費用を最小化することが社会の目的となる。そのためには始業時刻 $\hat{t}$ を中心としてボトルネックは完全利用されねばならない。さもないとラッシュアワーが前後に広がって、総スケジューリング費用が増加してしまうからである。したがって出発率は $W_b$ を下回ってはならない。以上からラッシュアワーの間、出発率をボトルネック容量 $W_b$ に等しくすることが最適である。

さらにラッシュアワー開始時刻と終了時刻におけるスケジューリング費用は等しくならねばならない。すなわち

$$\beta(\hat{t}-t_1)=\gamma(t_2-\hat{t}) \quad (3-18)$$

もし等しくなければ、小さい方にトリップを再配分することによって総スケジューリング費用を低下させることができる。なお(3-18)式は、無料金均衡においても成立していたことに注意されたい。このことは無料金均衡と社会的最適におけるラッシュアワーの長さは等しいことを意味する。

図 3-2 は、以上の分析にもとづいて無料金均衡および社会的最適のもとでの出発率の分布を描いたものである。



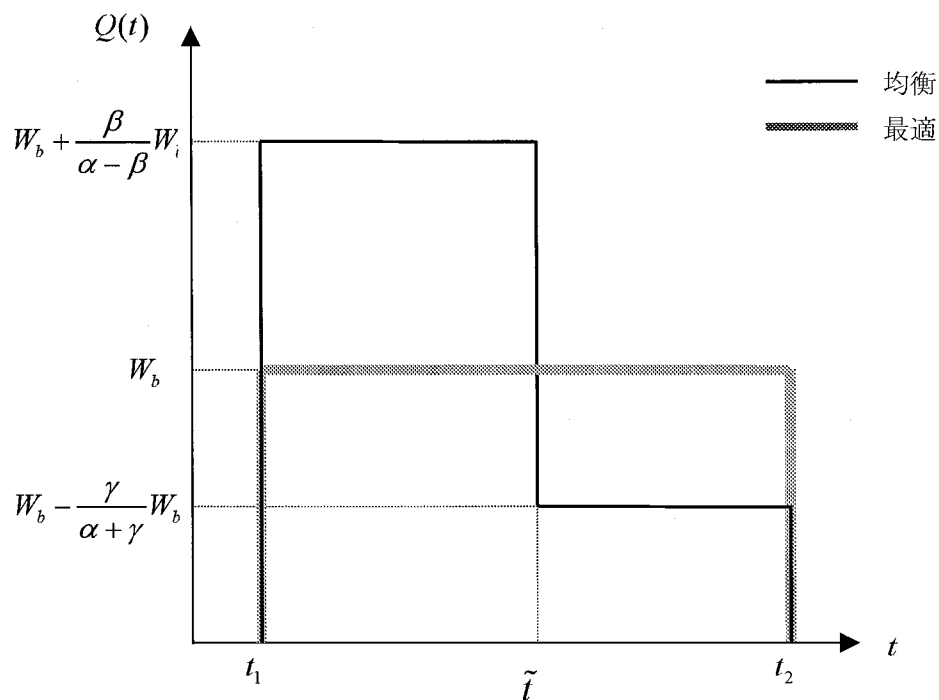


図 3-2 ボトルネックモデルにおける均衡と最適

社会的に最適な道路利用を分権的に達成するためには時刻ごとに変動するピークロード料金を課すればよい。最適では出発率がボトルネック容量に等しくなることは既に述べたが、そのときトリップ時間費用は一定になる。一方、出発時刻が始業時刻に近づくほどスケジューリング費用は小さくなる。分権的均衡では料金を含めた通勤費用が出発時刻にかかわらず一定にならねばならないので、最適な料金は（スケジューリング費用＋料金）が一定となるように設定すればよい。最適ピークロード料金およびスケジューリング費用の時間的推移を図 3-3 に示す。早着時間帯では始業時刻に近づくほどスケジューリング費用が減少するので、それと同じ率（単位時間当たり  $\beta$ ）で料金が上昇する。同様にして遅着時間帯では  $\gamma$  に等しい率で時間とともに減少する。したがって時刻ごとの料金スケジュールは、以下の通りである。

$$\tau(t) = \begin{cases} 0, & t < t_1 \\ a - \beta(\tilde{t} - t), & t_1 \leq t < \tilde{t} \\ a - \gamma(t - \tilde{t}), & \tilde{t} \leq t \leq t_2 \\ 0, & t_2 < t \end{cases} \quad (3-19)$$

ここに  $a = \frac{\beta\gamma}{\beta + \gamma} \frac{N}{W_b}$  である。 $a$ は、 $t < t_1$  または  $t_2 < t$  に出発する誘因をなくさせると同時に料金が非負であるという条件から導かれた。最適料金を課したときの均衡通勤費用は  $\alpha T_f + \frac{\beta\gamma}{\beta + \gamma} \frac{N}{W_b}$  であるが、これは(3-17)式に示した無料金均衡のときの通勤費用と等しい。すなわちボトルネック混雑の場合、料金によって通勤者の私的厚生を悪化させることなく混雑の経済損失を解消することができる。これはフロー混雑にもとづく Henderson の分析とは大きく異なる結論である。

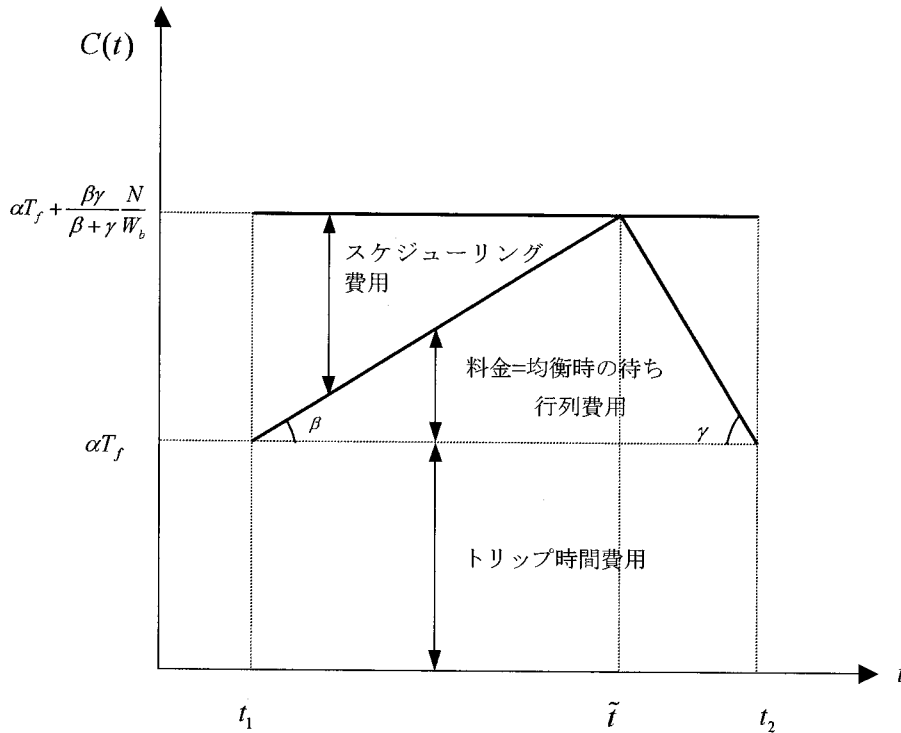


図 3-3



### 3-4 交通渋滞の動的モデルによる分析

第2章では、流体理論にもとづいて交通渋滞の動学モデルを定式化した。前節で紹介した二通りのモデル、すなわちフロー混雑のモデルとボトルネックモデルはそれぞれ無関係に見えるが、いずれも第2章のモデルの特殊ケースである。以下ではこのことを示すとともに、朝のラッシュアワーにおける道路利用の均衡と最適について分析する。

#### 3-4-1 トリップ時間に関する動学

渋滞が存在するとき、時刻 $t$ に出発する者のトリップ所要時間は第2章の(2-9)式により与えられたが、それを下に再掲する。

$$T(t) = \frac{J(t)}{V_J(W_b)} + \frac{L-J(t)}{V_N(Q(t))}$$

右辺第1項は渋滞区間を走行する時間、第2項は非渋滞区間を走行する時間である。上式を時間について微分することにより、次が得られる。

$$\begin{aligned}\dot{T}(t) &= \frac{\partial T}{\partial Q} \dot{Q}(t) + \frac{\partial T}{\partial t} J(t) \\ &= -\frac{L-J(t)}{\{V_N(Q(t))\}^2} \frac{dV_N}{dQ} \dot{Q}(t) + \left( \frac{1}{V_J(W_b)} - \frac{1}{V_N(Q(t))} \right) J(t) \\ &= -\frac{L-J(t)}{\{V_N(Q(t))\}^2} \frac{dV_N}{dQ} \dot{Q}(t) + \frac{Q(t) - W_b}{W_b}\end{aligned}\tag{3-20}$$

最後の式は、前章の(2-12)式を代入することによって得られたものである。渋滞列が存在しない場合( $J(t)=0$ )、上式の右辺第2項は消え、そのときこのモデルは、Henderson によるフロー混雑のモデルに基づいて導いた(3-9)式と一致する。一方、非渋滞区間における走行速度が交通量に依存しないと仮定すれば、

$\frac{dV_N}{dQ}=0$ なので、右辺第1項が消え、そのとき Vickrey タイプのボトルネックモ

デル((3-12)式)と一致する。すなわち本モデルは Henderson モデルと Vickrey モデルを特殊ケースとして含んでいる。

無料金均衡のもとでの時刻別交通量は、上式を(3-3)式に適用し、それを $Q(t)$ に

ついて解くことにより求められる。

### 3-4-2 最適な道路利用とピークロード料金

最適な道路利用とは、3-2-2 で定義したように、総通勤費用を最小化する時刻別流入交通量（出発人数）とラッシュアワーの時間帯（開始時刻、終了時刻）の組み合わせとして求められる。

$$\text{Min}_{Q(t), t_1, t_2, \tilde{t}} \int_{t_1}^{\tilde{t}} C^1(t) Q(t) dt + \int_{\tilde{t}}^{t_2} C^2(t) Q(t) dt \quad (3-21a)$$

ここに  $C^1(t) = \alpha T(t) + \beta(\hat{t} - t - T(t))$ 、 $C^2(t) = \alpha T(t) + \gamma(t + T(t) - \hat{t})$

最適制御問題として解く。制御変数は各時点  $t$  における出発台数  $Q(t)$  であり、状態変数は渋滞長  $J(t)$  と、時刻  $t$  までに出発した累積人数  $D(t)$  である。 $J(t)$  および  $D(t)$  に関する状態方程式は次の通り<sup>9</sup>

$$\dot{J}(t) = -G(t) = \begin{cases} -\frac{W_b - Q(t)}{K_J(W_b) - \frac{W_b}{V_N}(Q(t))}, & \text{if } J(t) > 0, \text{ or } Q(t) \geq W_b, \\ 0 & \text{if } J(t) = 0, \text{ and } Q(t) < W_b \end{cases} \quad (3-21b)$$

また

$$\dot{D}(t) = Q(t) \quad (3-21c)$$

また境界条件は

$$J(t_1) = 0, \quad (3-21d)$$

$$D(t_1) = 0, D(t_2) = N \quad (3-21e)$$

そして渋滞長の非負条件が加わる。

$$J(t) \geq 0 \quad (3-21f)$$

この問題は、(3-21a)に示した目的関数からもわかるように、始業時刻に対する早着(添え字 1)と遅着(添え字 2)という二通りの状況を結合した 2-Stage 最適制御問題 (Tomiya(1985)) になっている。(3-21a)における  $\tilde{t}$  は switching time と呼ばれ、一つの制御パラメータである。最適条件の詳細については章末の付

<sup>9</sup>  $\dot{J}(t)$  に関する式は、第 2 章の (2-15) 式を再掲したものである。

論で説明している。

最適解において渋滞は生じない。それは渋滞が生じた場合よりも短い走行時間で、同量の交通を処理するような解を（渋滞なしの状況で）見つけることができるからである。したがって次の二通りの交通状況のみが可能であり、それぞれについて最適条件が導出される。

Phase A:  $J(t)=0$  and  $Q(t) < W_b$

Phase B:  $J(t)=0$  and  $Q(t) = W_b$

Phase A は、流入交通量（=出発率）がボトルネック容量よりも低い状況であり、Phase B はボトルネック容量とちょうど等しい交通量がしばらく継続するような状況である。最適条件を分析することによって、Phase A が実現している間、早着の場合は  $\dot{Q}(t) > 0$  (for  $t < \tilde{t}$ ) であり、遅着の場合は  $\dot{Q}(t) < 0$  (for  $t > \tilde{t}$ ) となることがわかる（付論を参照）。このことから、早着の場合は交通量が単調に増加するが  $W_b$  を超えることはないので、Phase B が生じるとすればそれは必ず Phase A の後である。したがって早着の場合、ラッシュアワーが始まるとまず Phase A のもとで交通量が徐々に増え、ボトルネック容量  $W_b$  に等しくなった時点から Phase B に移行する。そして一旦 Phase B になると、早着の間は Phase A に戻ることはない。遅着の場合は以上と逆のプロセスで交通流の状態が遷移する。すなわち Phase B の後で Phase A に移行する。

### 3-4-3 最適なピークロード料金

最適解を実現するように、通勤者の出発分布を誘導するためには、出発時刻ごとに変動するピークロード料金を課すればよい。ピークロード料金が通勤者の分権的な出発時刻選択と整合的であるためには、各時刻において次の条件が成り立たねばならない。

$$(\alpha - \beta)T(t) + \beta(\hat{t} - t) + \tau(t) = C^o \quad \text{for } t_1^o \leq t \leq \tilde{t} \quad (3-22a)$$

$$(\alpha + \gamma)T(t) + \gamma(t - \hat{s}) + \tau(t) = C^o \quad \text{for } \tilde{t} < t \leq t_2^o \quad (3-22b)$$

ここに  $C^o$  は最適ピークロード料金のもとで均衡が達成されたときの私的通勤費である。なお料金は非負の値を持つものとする。上で議論した Phase 間の順序関係を考慮しながら、付論で導いた最適条件と (3-22) 式を対応させることにより、次のような最適料金スケジュールが得られる。

$$\tau(t) = \begin{cases} 0, & \text{for } t \leq t_1 \\ (\alpha - \beta)E_s(Q(t)), & \text{for } t_1 < t \leq t'_1 \\ (\alpha - \beta)E_s(W_b) + \beta(t - t'_1), & \text{for } t'_1 \leq t \leq \tilde{t} \\ (\alpha + \gamma)E_s(W_b) + \gamma(t'_2 - t), & \text{for } \tilde{t} \leq t \leq t'_2 \\ (\alpha + \gamma)E_s(Q(t)), & \text{for } t'_2 \leq t < t_2 \\ 0, & \text{for } t_2 \leq t \end{cases} \quad (3-23)$$

ここに  $E_s(Q(t)) = Q(t) \frac{\partial T(t)}{\partial V_N} \frac{dV_N}{dQ(t)}$  である。また  $t'_1$  と  $t'_2$  は、それぞれ、早着時に Phase

A から B に移行する時刻、及び遅着時に Phase B から A に移行する時刻である。 $E_s(Q(t))$  は、第 2 章で定義した静学的外部効果である。すなわち非渋滞区間において交通量が  $Q(t)$  のとき、一台の交通量増加が、同時に道路を利用する他の車両の速度を低下させる効果である。上の式より、Phase A が実現している間 ( $t_1 < t \leq t'_1$  または  $t'_2 \leq t < t_2$ )、料金は静学的外部効果の値に等しい。この原則は Henderson によるフロー混雑モデルから導いた (3-8) 式と同様である。一方、Phase B が実現している間 ( $t'_1 \leq t \leq t'_2$ )、 $E_s(W_b)$  は一定値なので料金は  $\beta$  あるいは  $\gamma$  の率で線形に推移する。この性質は、Vickrey 型のボトルネックモデルから導かれた、(3-19) 式と同様である。したがって本稿における最適ピークロード料金は、Henderson 型(Phase A)と Vickrey 型(Phase B)の解を特殊ケースとして含むものである。Henderson 型の料金は静学的外部効果を内部化する一方、Vickrey 型の料金は渋滞の発生（すなわち動学的外部効果）を完全に防止する。なお (3-23) 式に示したように、料金は非負なので、どの通勤者も  $t < s_1$  や  $t > s_2$  の時間帯に出発する誘因を持たない。

### 3-5 均衡解及び最適解のシミュレーション分析

#### 3-5-1 関数の特定化とパラメータの設定

まず交通量－速度の関係式は、第 2 章で導いた式(2-4)を用いる。

$$V_N(Q) = \frac{V_f}{2} \left( 1 + \sqrt{1 - \frac{Q}{W_a}} \right)$$

$$V_J(Q) = \frac{V_f}{2} \left( 1 - \sqrt{1 - \frac{Q}{W_a}} \right)$$

ここに  $V_f$  は自由走行速度である。

道路区間の交通条件については、次のようにパラメータを設定した。

道路区間の長さ :  $L = 20$  (km)

道路区間の交通容量 :  $W_a = 3600$  (台/時) = 60 (台/分)

ボトルネックの交通容量 :  $W_b = 2400$  (台/時) = 40 (台/分)

自由走行速度 :  $V_f = 80$  (km/時)

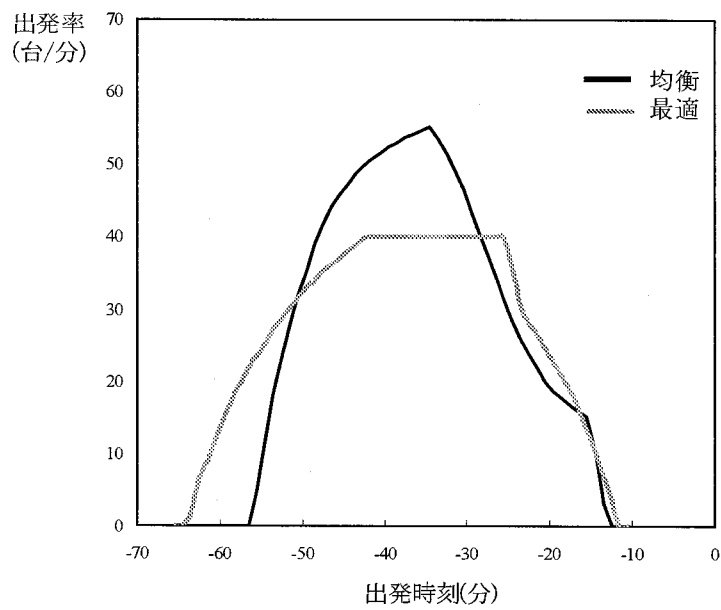
これらの値は、日本の名神高速道路を対象とした実証研究 (Makigami, et. al. (1984)) の結果を参考にしている。

走行時間の金銭的評価値  $\alpha$  は、日本交通政策研究会(1988)による計測例を参考に、2000 円/時とした。早着および遅着の時間価値に関しては、日本を対象として本モデルと整合的な計測を行った例を知らない。そこで、しばしば引用される Small(1982)の計測例における走行時間価値との比率を参考にし  $\beta/\alpha = 0.4, \gamma/\alpha = 2.1$  とした。

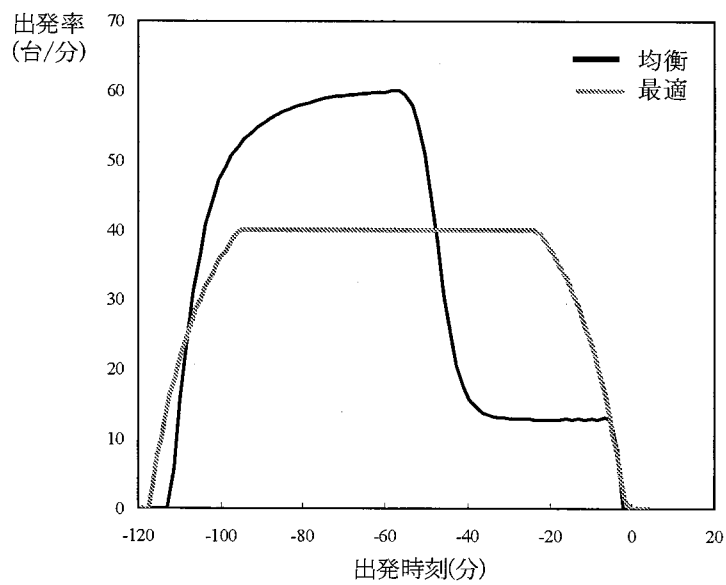
### 3-5-2 均衡解と最適解の比較

図 3-4 には、総通勤者数  $N$  が 1500 と 4000 の二通りのケースについて、均衡解と最適解のもとでの出発時刻分布をプロットしている。

いずれのケースにおいても、均衡における交通量は、ある時刻からボトルネック容量を超過しており、渋滞が発生している。しかし最適では、ボトルネック容量に達するまでは単調に増加するものの、そこまで達すればボトルネック容量に等しい率で出発する状態が継続する。図 3-4(a)における出発分布の形状は Henderson (1981)が導いたもの(図 3-1)と似ている。この場合、総交通量が少なく渋滞は軽微なので、非渋滞領域における混雑の影響が支配的なのである。一方、図 3-4(b)の出発分布は Vickrey 型のボトルネックモデルによって導いたもの(図 3-2)によく似ている。すなわち早着時間帯においては一定の高い出発率が続く、遅着時間帯にスイッチした直後から一定の低い率で出発する状態が継続する。この場合は、激しい渋滞が生じるので、ボトルネックからの渋滞列において費やす時間の項が支配的となったためである。



(a)  $N = 1500$



(b)  $N = 4000$

(注) 出発時刻は始業時刻を0に基準化している。

図3-4 均衡および最適な出発分布

本モデルにおいては総トリップ数が固定されているので、道路利用に関する社会的厚生は総通勤費用（(3-4)式において定義された  $V$ ）で表わされる。一方、利用者の私的厚生は私的トリップ費用（均衡解のもとでは(3-2)式の  $C^*$ 、最適解のもとでは料金込みの額である(3-22)式の  $C^o$ ）で表わされる。図 3-5 には、総トリップ数の変化が、無料金均衡と社会的最適のもとでの私的厚生および社会的厚生に及ぼす影響を図示している。

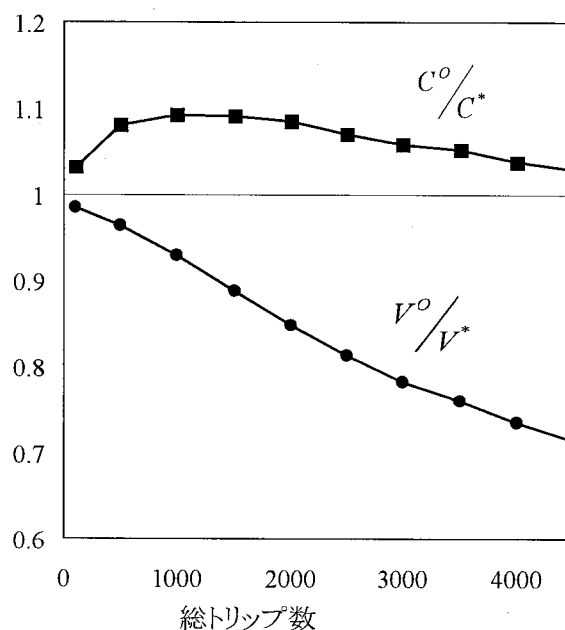


図3-5 総トリップ数と最適／均衡における総通勤費

図を見ると  $C^o/C^*$  の値は常に 1 より大きい、すなわち私的厚生は混雑料金導入により低下する。しかしその程度は総トリップ数に依存して変動する。総トリップ数の小さい場合には混雑の水準が低いので混雑料金の額も小さく、私的厚生の低下は小さい。一方、総トリップ数がかかなり大きい場合には、無料金均衡で渋滞が激しくなるので、混雑料金による渋滞防止効果が大きく、最適なピークロード料金導入による私的厚生の低下割合が減少する。社会的厚生の改善度を示す  $V^o/V^*$  の値は総トリップ数が増加するにしたがい、単調に低下している。

すなわち渋滞の激しい状況であるほど、混雑料金導入による社会的トリップ費用の節約額が大きくなる。したがって渋滞の激しい状況では、混雑料金導入の効果は大きく、かつ私的厚生の低下が相対的に少ないので、混雑料金導入が特に望ましい。

### 3-6 おわりに

本章では、動的な現象である交通渋滞を記述するモデルを、朝の通勤ラッシュアワーにおけるピークロード問題に適用し、利用者均衡と最適な道路利用を導いた。

ここで得られた結果は次の通り。

(1)交通渋滞の動学モデルは、フロー混雑に基づく Henderson 流の解と、ボトルネックの待ち行列に基づく Vickrey 流の解を、それぞれ特殊ケースとして含む、統合モデルである。

(2)朝のラッシュアワーにおける最適な道路利用を達成するためには時刻ごとに変動するピークロード料金を課す必要がある。このような料金の役割は、非渋滞流における静的外部効果を内部化すること、および渋滞の発生を抑止することである。

(3)均衡において生ずる渋滞が激しくなるほど、ピークロード料金による利用者の私的厚生の減少は相対的に小さくなり、渋滞解消による社会的便益は大きくなる。

本章で導いたような、時々刻々と変動する料金システムを実施することは、現状では困難と思われる。したがって厳密には最適ではないが、実行可能な次善の料金システムを考案し、その効果を分析することが今後の課題としてあげられる。たとえば Arnott ら(1990a)は、単純なボトルネックモデルに基づいてではあるが、次善の料金として二段階に変動する料金制の効果を分析している。ただし次善のシステムが最適解に比べてどの程度有効かを評価するためにも、ここで導いた最適解は重要な情報になる。



付論： 最適な道路利用の条件

目的関数(3-21a)について、ハミルトニアンが次のように定義される。

$$\mathcal{H}^j(t) = -C^j(t)Q(t) - \Omega^j(t)G(t) + \lambda^j(t)Q(t), \quad j=1,2 \quad (3A-1)$$

ここに  $\Omega^j(t)$  と  $\lambda^j(t)$  は、それぞれ、状態方程式(3-21b)と(3-21c)に関する随伴変数である。上付き添え字  $j$  は早着( $j=1$ )および遅着( $j=2$ )時間帯を表している。最大原理によれば、最適解は制約条件(3-21f)のもとでハミルトニアンを最大化する。そこで下のようなラグランジアンを定義する。

$$\mathcal{L}^j(t) = \mathcal{H}^j(t) + \eta(t)J(t) \quad (3A-2)$$

ここに  $\eta(t)$  は渋滞長の非負条件(3-21f)に関するラグランジュ乗数である。

早着時間帯( $j=1$ )における 1 階の条件は次の通り

$$-[(\alpha - \beta)T(t) + \beta(\hat{s} - t)] - (\alpha - \beta)Q(t) \frac{\partial T(t)}{\partial V_N} \frac{dV_N}{dQ(t)} - \Omega^1(t) \frac{dG(t)}{dQ(t)} + \lambda^1(t) = 0 \quad (3A-3)$$

$$\eta(t)J(t) = 0, \quad \eta(t) \geq 0 \quad (3A-4)$$

また随伴変数  $\Omega^1(t), \lambda^1(t)$  は次の関係を満たさねばならない。

$$\begin{aligned} \dot{\Omega}^1(t) &= -\frac{\partial \mathcal{L}^1}{\partial J(t)} \\ &= (\alpha - \beta)Q(t) \left\{ \frac{1}{V_J(W_b)} - \frac{1}{V_N(Q(t))} \right\} - \eta(t) \end{aligned} \quad (3A-5)$$

$$\dot{\lambda}^1(t) = -\frac{\partial \mathcal{L}^1}{\partial D(t)} = 0. \quad (3A-6)$$

ラッシュアワーの開始時間  $t_1$  は制御パラメータであるが、これに関する最適条件は

$$\mathcal{H}^1(t_1) = -[(\alpha - \beta)T(t_1) + \beta(\hat{t} - t_1)]Q(t_1) - \Omega^1(t_1)G(t_1) + \lambda^1(t_1)Q(t_1) = 0. \quad (3A-7)$$

遅着時間帯( $j=2$ )に関する最適条件は早着の場合と基本的に同様であるが、式(3A-3)、(3A-5)、(3A-7)はそれぞれ次のように書き換えられる。

$$-[(\alpha + \gamma)T(t) + \gamma(t - \hat{t})] - (\alpha + \gamma)Q(t) \frac{\partial T(t)}{\partial V_N} \frac{dV_N}{dQ(t)} - \Omega^2(t) \frac{dG(t)}{dQ(t)} + \lambda^2(t) = 0 \quad (3A-3)'$$

$$\dot{\Omega}^2(t) = (\alpha + \gamma)Q(t) \left\{ \frac{1}{V_J(W_b)} - \frac{1}{V_N(Q(t))} \right\} - \eta(t) \quad (3A-5)'$$

$$\mathcal{H}^2(t_2) = -[(\alpha + \gamma)T(t_2) + \gamma(t_2 - \hat{t})]Q(t_2) - \Omega^2(t_2)G(t_2) + \lambda^2(t_2)Q(t_2) = 0. \quad (3A-7)'$$

Tomiyama (1985)によれば、スイッチング時刻  $\tilde{t}$  において下のような条件が成り立つ。

$$\Omega^1(\tilde{t}) = \Omega^2(\tilde{t}) \quad (3A-8)$$

$$\lambda^1(\tilde{t}) = \lambda^2(\tilde{t}) \quad (3A-9)$$

$$\mathcal{H}^1(\tilde{t}) = \mathcal{H}^2(\tilde{t}). \quad (3A-10)$$

そして  $t_2$  における横断性条件は

$$\Omega^2(t_2) \geq 0, \quad J(t_2)\Omega^2(t_2) = 0. \quad (3A-11)$$

(3A-6)より、随伴変数  $\lambda^j(t)$  の値は時間について一定の値を取るなので、これを  $\lambda^j(t) = \bar{\lambda}$  のように書くことにする。また  $t_1$  において  $J(t_1) = 0$  なので (3A-7) の右辺第3項は消え、下記のようになる。

$$(\alpha - \beta)T(t_1) + \beta(\hat{t} - t_1) = \bar{\lambda}. \quad (3A-12)$$

上式の左辺はラッシュアワーで最も早く出発する通勤者の私的トリップ費用である。最初の通勤者は（前に誰もいないので）自由走行速度で運転することを考慮すれば  $T(t_1) = L/V_f$  となる。一方、 $t_2$  においては、 $J(t_2) = 0$  かどうかは明らかでない。しかし  $J(t_2) = 0$  なら状態方程式(3-21b)式より  $G(t_2) = 0$ 、 $J(t_2) > 0$  だとしても横断性条件(3A-11)より  $\Omega^2(t_2) = 0$  なので、いずれにしても(3A-7)'の右辺第3項は消え、次が得られる。

$$(\alpha + \gamma)T(t_2) + \gamma(t_2 - \hat{t}) = \bar{\lambda} \quad (3A-12)'$$

また(3A-8)、(3A-9)、(3A-10)より、 $\tilde{t} + T(\tilde{t}) = \hat{t}$  を得る。この式はスイッチング時刻に出発した通勤者は、ちょうど始業時刻に到着することを意味している。すなわちこの通勤者はスケジューリングコストを負わない。このことは定義から自明であるが、一つの最適条件として導かれるのである。

各時刻における出発率に関する最適条件については、以下で3通りの状況ごとに説明する。

**[Phase A]**  $J(t) = 0$  かつ  $Q(t) < W_b$

この状況では、状態方程式(3-21b)より  $G(t) = 0$  なので、最適条件(3A-3)と(3A-3)'は次のようになる

$$(\alpha - \beta)T(t) + \beta(\hat{t} - t) + (\alpha - \beta)Q(t) \frac{\partial T(t)}{\partial V_N} \frac{dV_N}{dQ(t)} = \bar{\lambda} \quad \text{for } t_1 \leq t \leq \tilde{t} \quad (3A-13a)$$

$$(\alpha+\gamma)T(t)+\gamma(t-\hat{t})+(\alpha+\gamma)Q(t)\frac{\partial T(t)}{\partial V_N}\frac{dV_N}{dQ(t)}=\bar{\lambda} \quad \text{for } \tilde{t}<t\leq t_2 \quad (3A-13b)$$

ここに左辺第1項と第2項の和は時刻 $t$ に出発した通勤者の私的交通費用であり、第3項はこの時刻に出発する通勤者がわずかに増加することによって、同時に走行するすべてのドライバーが被る（非渋滞流での）交通費用の増分である。この結果は、3-3-1において Henderson モデルについて導いた条件と同様である。しかし本研究においてこの条件が成り立つのは一つの特殊ケースに過ぎない。(3A-13a)において左辺第1項と3項は $Q(t)$ とともに増加する一方、第2項は時間とともに減少する。このことから $t<\tilde{t}$ の間は $\dot{Q}(t)>0$ となる。同様にして $t>\tilde{t}$ の間は $\dot{Q}(t)<0$ を示すことができる。

**[Phase B]**  $J(t)=0$  かつ  $Q(t)=W_b$

このとき、ボトルネックの容量 $W_b$ に等しい交通量が道路に流入する状況がしばらく継続する。最適条件(3A-3)と(3A-3)'は次のようになる。

$$(\alpha-\beta)T(t)+\beta(\hat{t}-t)+(\alpha-\beta)W_b\frac{\partial T(t)}{\partial V_N}\frac{dV_N}{dQ(t)}+\Omega^1(t)\frac{dG}{dQ}=\bar{\lambda} \quad \text{for } t_1\leq t\leq \tilde{t} \quad (3A-14a)$$

$$(\alpha+\gamma)T(t)+\gamma(t-\hat{t})+(\alpha+\gamma)W_b\frac{\partial T(t)}{\partial V_N}\frac{dV_N}{dQ(t)}+\Omega^2(t)\frac{dG}{dQ}=\bar{\lambda} \quad \text{for } \tilde{t}<t\leq t_2 \quad (3A-14b)$$

Phase A との違いは、左辺に第4項が加わったことである。上式の両辺を時間で微分し、交通量の時間変化がないことを考慮することによって、次を得る。

$$\begin{aligned} \dot{\Omega}^1(t) &= \frac{\beta}{dG/dQ}, \quad \text{for } t_1 < t \leq \tilde{t} \\ \dot{\Omega}^2(t) &= -\frac{\gamma}{dG/dQ}, \quad \text{for } \tilde{t} < t < t_2 \end{aligned} \quad (3A-15)$$

なお、交通量が $W_b$ に等しく一定なので $dG/dQ$ も定数であり、 $\dot{\Omega}(t)$ も一定になる。すなわち上式の左辺第4項はスケジューリング費用の変化と同率で変化する。

**[Phase C]**  $J(t)>0$ ,

この状況では (3A-3)、(3A-3)' は次のようになる。

$$(\alpha-\beta)T(t)+\beta(\hat{t}-t)+(\alpha-\beta)Q(t)\frac{\partial T(t)}{\partial V_N}\frac{dV_N}{dQ(t)}+\Omega^1(t)\frac{dG}{dQ}=\bar{\lambda} \quad \text{for } t_1\leq t\leq \tilde{t} \quad (3A-16a)$$

$$(\alpha + \gamma)T(t) + \gamma(t - \hat{t}) + (\alpha + \gamma)Q(t) \frac{\partial T(t)}{\partial V_N} \frac{dV_N}{dQ(t)} + \Omega^2(t) \frac{dG}{dQ} = \bar{\lambda} \quad \text{for } \tilde{t} < t \leq t_2$$

(3A-16b)

第4項は、第2章で示されたと同様の動学的外部効果を表している。実は、この Phase C が最適解として実現することはない。このことに関する直感的説明は以下の通りである。Phase C のように渋滞が生じた場合、ボトルネックから流出する交通量は  $W_b$  であり、渋滞列の中では速度が  $V_j(W_b)$  である。ところが Phase B のように、流入交通量が  $W_b$  に等しい場合、ボトルネックから流出する交通量も  $W_b$  である。このとき流出交通量が等しいので総スケジューリング費用は Phase B と同じであるが、渋滞が生じていないので速度 ( $=V_N(W_b)$ ) は高い。したがって Phase C のように、出発率  $Q(t)$  が  $W_b$  を超え、渋滞が生じるような状況は総通勤費用を最小化しない。

ところで、Phase A の状況では、必ず  $\dot{Q} > 0 (t < \tilde{t})$ ,  $\dot{Q} < 0 (t > \tilde{t})$  となることを上で述べた。早着の場合、Phase A で流入交通量が単調に増加して  $W_b$  に達すると Phase B に移行するが、早着時間帯内で Phase A に再び戻ることはない。同様の理由で、遅着の場合は必ず Phase B の後で Phase A に移行する。

## 第4章 交通需要マネジメントーフレックスタイム\*

### 4-1 はじめに

交通混雑の対策として、主に道路の拡幅や新設など交通容量の拡大のために巨額の投資が行われてきたが、すでに述べたようにこのような政策は、多くの場合、それほど有効でないばかりでなく、既成市街地では長い期間と莫大な費用を要するので、ますます困難になりつつある。そこで交通需要を制御することを目的として、自動車利用の方法、トリップ手段やトリップ時刻などを変更させることにより、混雑の緩和を図るための方法が提案され、実施されている。これらの施策は交通需要マネジメント(Transport Demand Management; TDM)と総称されており、かつてに比べると交通政策において重要視されている<sup>1</sup>。混雑料金はトリップに関するあらゆる選択に影響を与えるという意味で究極の交通需要マネジメントといえるが、さまざまな社会的制約によりその実施は容易でない。上述のような種々の TDM 手法は、混雑料金が実施できない場合の次善の手段と考えることができる。

本章では、朝夕の通勤ラッシュ時における交通混雑の緩和策として期待されているフレックスタイムに着目する。現在、ほとんどの企業は 8 時 30 分や 9 時に設定された始業時刻までにすべての労働者が出勤することを求めている。第3章で分析したように、労働者は始業時刻ちょうどに出勤しようとするれば激しい混雑に耐えねばならないが、それよりも早く出勤すれば混雑を回避する代わりにスケジューリング費用が発生するというトレードオフに直面する。ところがフレックスタイム制が導入されると、労働者は同一時刻に勤務を開始する必要がなくなるので、自ら混雑を回避するよう出勤時刻を選択することによって、ピークが平滑化されるのである。

---

\* 本章のもとになった論文(文・米川(1999)および Mun and Yonekawa (1999))に対し、小林潔司、八田達夫、藤田昌久、Richard Arnott の諸氏より貴重なコメントをいただいた。

<sup>1</sup> 代表的な TDM 手法としては、相乗り、パーク・アンド・ライド、物資の共同集配、フレックスタイム、時差通勤、交通情報の提供、土地利用規制、ロードプライシングなどが含まれる(室町(1999))。

フレックスタイム制度は、実際に一部の企業で導入されている実績もあるので、実行可能性という観点からも有望な手段といえる。近年、この制度を導入する企業が徐々には増えていることは確かであるが、現時点では、混雑に対して有意な影響を及ぼすほど普及しているとはいいがたい<sup>2</sup>。その原因としては、フレックスタイムの導入が、社会的には好ましくても、私的企業あるいは個人の誘因と整合的でない可能性が考えられる。

都市における企業は、相互に頻繁なコミュニケーションや取引を行っているが、フレックスタイムの導入は、これらの活動を阻害する効果がある。たとえば、ある企業の従業者が取引先企業の社員と面談しようとしても、その相手が出勤していなければ面談が成立しない。このように両者が面談可能な時間帯に制約を加えることは、結果としてコミュニケーション活動に依存する企業の生産性を低下させる<sup>3</sup>。混雑緩和の便益がこのような生産性低下のコストを上回らない限り、企業はフレックスタイムを導入する誘因を持たない。

上記のような、混雑緩和効果と生産性低下効果とのトレードオフは、Henderson (1981)において初めて明示的に定式化された。この研究では、各企業が個別に始業時刻を選択する方式(staggered work hours)を想定して、均衡および最適な始業時刻分布を分析した。結果として各企業が連続的に異なる始業時刻を選択することになるが。このような状況は現実には想定し難い。多くの場合、始業時刻は限定的な時刻、たとえば 8:30、9:00、9:30 といった時刻に集中していることが報告されている(たとえば Wilson (1988)を見よ)。さらに、Henderson は始業時刻が各企業によって完全に分散するケースのみを分析しており、時差始業制と伝統的な固定始業制の比較はない。このため、固定始業制から時差始業制へ移行した場合の経済効果については明らかにされていない。また前章で

---

<sup>2</sup>日本では、フレックスタイムを導入している企業の従業者数の割合は 1989 年の 2.3% から 1998 年の 7.7% に増加している(労働省(1999))。なお、アメリカのケースは Beers (2000) に詳しい。

<sup>3</sup>一方で、フレックスタイム制度が生産性を向上させるという議論もある。すなわち労働者はより熱心に働くようになり、企業は同じ賃金を払ってもより質の高い労働者を惹きつけることができると考えられるからである(たとえば、Shepard, Clifton and Kruse (1996))。本研究では、フレックスタイム制を実施している企業が比較的低い賃金で労働者を雇えるようになるという結果が得られるが、これは後者の効果を反映していると考えられる。

議論したように、本来動学的な枠組みであるにもかかわらず交通混雑は静的モデルによって記述されている。

本研究では通勤者の交通行動と企業の生産活動をモデル化し、フレックスタイム制の採用に関する企業の選択行動とその帰結である均衡解を分析する<sup>4</sup>。このような分析によって、フレックスタイム制が企業や個人の誘因と整合的であるのかどうか、そして混雑緩和に有効となるほど多くの企業で導入されるためにはどのような政策が必要か、などについて示唆を得ることが本研究の目的である。

各企業はフレックスタイム制と固定勤務制（9時から5時）の選択に直面するが、この状況は時差始業制のもとで始業時刻に関する企業の選択が連続的であったのとは対照的に、離散的選択である<sup>5</sup>。都市内の企業は、フレックスタイム制を導入する企業（タイプ1）と固定的始業時刻制を導入する企業（タイプ2）の二つに分類される。タイプ1の労働者は始業時刻を自由に選べるため、交通混雑のピークを回避できる。一方、生産性については、先に述べたようにタイプ1の企業の方がタイプ2よりも低くならざるをえない。均衡でのタイプ1と2の労働者数は、混雑と生産性のトレード・オフに直面する企業と労働者の選択により内生的に決定される。このように離散的選択（すなわちタイプ1かタイプ2かという選択）として定式化することにより、連続選択アプローチによる Henderson (1981)とは異なる結果が得られる。たとえば、タイプ別企業数の分布について複数の均衡解が得られる。一つの解は一部の企業がフレックスタイムを採用している状況、もう一つの解ではフレックスタイムを採用している企業が存在しない状況である。経済厚生的一面では前者の解が望ましいものであるにもかかわらず、それよりも劣る後者の解が実現する可能性が高い。

以下、4-2ではモデルの枠組みを示し、均衡で二つのタイプの企業（労働者）数が決定される条件を説明する。フレックスタイムを採用する企業が存在するための条件は、タイプ1の私的純便益がタイプ2よりも大きくなることである。

---

<sup>4</sup> Moss and Curtis (1985)はフレックスタイムが労働者の行動に与える影響を分析した。しかし、交通混雑や都市の生産性への影響は考慮されていない。

<sup>5</sup> 奥村・小林・田中 (1999)は時差始業制のもとでの離散選択問題の研究を行っている。Henderson とは異なり、二つの始業時刻の選択肢しか存在しないことを仮定している。

ここで私的純便益とは、労働者一人当たり生産額から通勤費用を引いたものとして定義される。4-3 では交通混雑と通勤者の出発時刻選択を定式化し、均衡出発パターンを解くことにより通勤費用を求める式を導く。4-4 では二つのタイプの企業の生産額を求める。4-5 では、4-3 と 4-4 で求めた通勤費用と生産額の計算式を、4-2 で定義した均衡条件に適用して均衡解の性質を調べ、その効率性を評価する。さらには混雑料金の効果も調べる。そして、4-6 はまとめである。

## 4-2 モデル

都市は業務地区（CBD）と住宅地から成るものとする。すべての生産活動は CBD で行われ、労働者は住宅地から CBD まで道路を通して通勤する。企業は規模に関して収穫一定な技術を用いて同質な財を生産し、投入要素は労働のみである。都市には 2 種類の企業が存在する。一方はフレックスタイム制を採用しており（タイプ 1）、他方は固定的始業時刻制を採用している（タイプ 2）。各企業はフレックスタイム制または固定的始業時刻制のいずれかを選ぶ。収穫一定なので各企業の行動は、次の式で表されるような労働者一人当たり利潤の最大化として記述できる。

$$\pi_i = Y_i - w_i. \quad (4-1)$$

ここに、添え字  $i$  ( $i=1,2$ ) は、企業のタイプを表す。また、 $Y_i$  と  $w_i$  はそれぞれタイプ  $i$  の企業における一人当たり生産額と賃金である。

各労働者は自分の労働力を供給すべき企業のタイプを選ぶが、その際、企業間の移動は費用をかけずに行うことができると仮定する。各労働者の目的は純所得の最大化であり、これは賃金から通勤費用を差し引いたもの、すなわち  $w_i - C_i$  として定義される。ここに  $C_i$  はタイプ  $i$  の企業に勤める労働者の通勤費用である。

タイプ 1 と 2 の労働者数をそれぞれ  $N_1$  と  $N_2$  で表す。都市内の総労働者数  $N$  は外生的に与えられ、 $N_1 + N_2 = N$  がという関係が成り立つものとする。均衡解を CBD 内のタイプ別企業数の分布によって分類すると、

〔ケース A〕すべての企業が固定的始業時刻



〔ケース B〕すべての企業がフレックスタイムを実施

〔ケース C〕一部の企業がフレックスタイムを実施

ここで、ケース C は内点解であり、A と B は端点解となる。

均衡は、各労働者が勤務する企業のタイプを変えるインセンティブを持たないと同時に、各企業が始業時刻制度を変えるインセンティブを持たなくなるとき達成される。両タイプの企業数が正であるような内点均衡では、各タイプの企業に勤める労働者の純所得は等しく、また企業についてもタイプ間で利潤は等しくならなければならない。すなわち

$$N_1^* > 0, N_2^* > 0 \Rightarrow Y_1 - w_1 = Y_2 - w_2 \text{ かつ } w_1 - C_1 = w_2 - C_2 = w^*, \quad (4-2)$$

ここに  $N_i^*$  は均衡においてタイプ  $i$  に勤める労働者数である。式(4-2)の二つの式は、次のように一つの式にまとめることができる。

$$N_1^* > 0, N_2^* > 0 \Rightarrow Y_1 - C_1 = Y_2 - C_2. \quad (4-3a)$$

同様に、端点解についても下記のように均衡条件が定義される。

$$N_1^* = N, N_2^* = 0 \Rightarrow Y_1 - C_1 \geq Y_2 - C_2 \quad (4-3b)$$

$$N_1^* = 0, N_2^* = N \Rightarrow Y_1 - C_1 \leq Y_2 - C_2 \quad (4-3c)$$

以下では、 $Y_i - C_i$  ( $i=1,2$ ) を私的純便益と呼ぶ。式(4-3a)、(4-3b)、(4-3c)はそれぞれ上に定義されたケース C、B、A に対応する。各ケースごとの通勤費用  $C_i$  および生産額  $Y_i$  の具体的な形はそれぞれ以下の 4-3 および 4-4 で説明する。

### 4-3 交通混雑と通勤者の出発時刻選択

本章では、Vickrey 型のボトルネック・モデルを用いてラッシュアワーの混雑を定式化する。ボトルネック・モデルは、道路を同時に利用しているドライバーだけでなく異なる時刻に道路を利用するドライバーによって混雑水準が決まるような動学的な過程を記述することができる。

住宅地と CBD は一本の道路で結ばれており、道路には CBD の直前にボトルネックがあるものとする。車は自宅からボトルネック地点までを一定速度で走行する。したがって、この区間の走行時間は一定である。待ち行列は交通量 (= 住宅地から出発する単位時間当たりトリップ数) がボトルネック容量を超過する場合に発生する。時刻  $t$  に出発した場合の走行時間  $T(t)$  は、次のように定義さ

れる<sup>6</sup>。

$$T(t) = T_f + \frac{M(t)}{W_b}, \quad (4-4)$$

ここで、 $M(t)$ は（車の台数で測った）待ち行列の長さである。第2項は待ち時間を表す。本質的な結果に影響しないので、以下では Arnott ら(1990a)にならい、 $T_f = 0$ を仮定する。

時刻  $t$  に出発した人が経験する待ち行列の長さは次のように求められる。

$$M(t) = \int_{t_q}^t [Q(s) - W_b] ds, \quad (4-5)$$

ここに、 $t_q$ は待ち行列が発生する時刻であり、 $Q(t)$ は時刻  $t$  に住宅地を出発するトリップ数である。

毎朝、 $N$ 人の労働者が、道路を使って自宅から CBD の勤務先まで通勤するものとする。労働者は皆同質であり、一日に  $I$  時間勤務する。

タイプ2に勤める労働者は、定められた始業時刻までに着かなければならず、遅刻は許されないものと仮定する。このタイプの労働者にとって通勤費用は走行時間費用とスケジューリングコストからなる。第3章のモデルと同様、スケジューリングコストは、定められた勤務時刻より早く勤務先に着く場合に、始業時刻まで待機する時間の機会費用である<sup>7</sup>。一方、タイプ1に勤める労働者は、（フレックスタイム制を導入しているため）始業時刻を選ぶことができる。すなわちフレックスタイム制の労働者にとってスケジューリングコストはゼロであり、通勤費用は走行時間費用のみになる。各労働者は、通勤費用を最小化するように出発時刻を選ぶ。

---

<sup>6</sup> 第2章と3章で論じたように、このタイプのボトルネックモデルは交通流の動学モデルを大胆に単純化したものであるが、現象の本質を損なうことなく解析を容易にする点を重視して採用した。

<sup>7</sup> Henderson (1981)は、スケジューリングコストをもう少し広い意味で捉えていた。たとえば、家族にとっての最適なスケジュールとの乖離による不便さなどである。本稿のモデルでも、 $i$ を個人の仕事以外の活動にとって最適な時刻であると解釈すれば可能である。現実には、固定された始業時刻と個人活動にとっての最適な時刻は一致しない。この両方を考慮したモデルを作ることは可能であるが、分析を複雑化するだけで新しい結果は期待できない。

以下では、各ケース（A、B、C）ごとに労働者の出発時刻分布と通勤パターンを求めることにする。

〔ケース A〕 すべての企業が固定的な始業時刻の場合

このケースは、遅着を考慮していない点を除けば、第3章の3-3-2で示したものと同一である。すべての企業が固定的始業時刻制を採用しており、始業時刻は $\hat{t}$ で統一されているとする。時刻 $t$ に出発した労働者の通勤費用は次のように表わされる。

$$C(t) = \alpha T(t) + \beta(\hat{t} - t - T(t)) \quad \text{for } t + T(t) \leq \hat{t}, \quad (4-6)$$

ここに、 $\alpha$ は走行時間一単位の金銭的評価値、 $\beta$ は早着による待機時間一単位の価値を表す。第3章と同様、 $\alpha > \beta$ を仮定する。

均衡は、すべての通勤者が出発時刻を変更する誘因を持たなくなったときに達成される。通勤者は同質であるので、どの出発時刻を選んでも通勤費は等しくならねばならない。したがって $\frac{\partial C(t)}{\partial t} = 0$ が成り立つ。式(4-4)、(4-5)を式(4-6)

に代入し、この条件を適用すると、

$$Q(t) = \frac{\alpha W_b}{\alpha - \beta} \quad (t_1 \leq t \leq t_2). \quad (4-7)$$

ここに、 $t_1$ は最初の通勤者の出発時刻、 $t_2$ は最後の通勤者（すなわち始業時刻ちょうどに着く）の出発時刻である<sup>8</sup>。時刻 $t_1$ に出発する最初の通勤者は待ち行列に遭わないため、この通勤者はスケジューリングコストのみを負う。したがって、通勤費用は次のようになる。

$$C(t_1) = \beta(\hat{t} - t_1). \quad (4-8)$$

均衡時においては $C(t_1) = C(t)$ が成り立つので、各時刻に出発する通勤者の走行時間は次のように求められる。

$$T(t) = \frac{\beta}{\alpha - \beta}(t - t_1) \quad (t_1 \leq t \leq t_2), \quad (4-9)$$

$t_1$ と $t_2$ は次の二つの方程式を解くことによって得られる。

---

<sup>8</sup> 実際には、 $t_1$ は式(4-2)の $t_q$ （待ち行列が形成され始める時刻）に等しい。

$$N = \int_{t_1}^{t_2} Q(t) dt \quad (4-10)$$

$$t_2 + T(t_2) = \hat{t} \quad (4-11)$$

式(4-10)は、 $t_1$ と $t_2$ の間に家を出た通勤者の合計が $N$ であることを意味し、式(4-11)は、時刻 $t_2$ に出発（すなわち最後に出発）した者は $\hat{t}$ に着くことを意味する。

式(4-10)、(4-11)を解くことにより次が得られる。

$$t_1 = \hat{t} - \frac{N}{W_b} \quad (4-12)$$

$$t_2 = \hat{t} - \frac{\beta N}{\alpha W_b} \quad (4-13)$$

式(4-8)と(4-12)より、次のようにケース A のもとでの均衡通勤費が得られる。

$$C^A = \frac{\beta N}{W_b} \quad (4-14)$$

図4-1は累積出発台数と到着台数の時間的推移を示している。累積出発台数は単位時間当たり $\frac{\alpha W_b}{\alpha - \beta}$ の率で増加するのに対し、到着台数はボトルネック容量制約のため $W_b$ の率で増加するのみなので、待ち行列が形成される。台数で計った待ち行列の長さは二つの曲線の垂直（縦軸）方向の距離に等しく、時間で計った待ち行列の長さ（待ち行列の中で過ごす時間）は二つの曲線の水平距離に等しい。

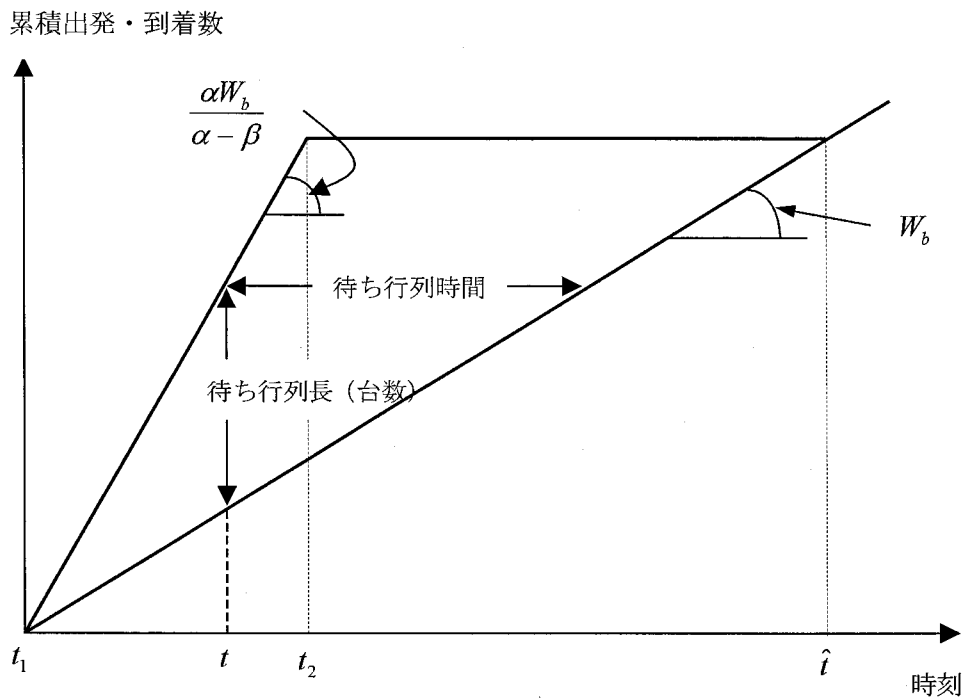


図 4-1 ケース A のもとでの累積出発・到着数の時間推移

#### 〔ケース B〕 すべての企業がフレックスタイム制の場合

典型的なフレックスタイム制度は、コアタイムという時間帯を設定し、その時間帯に必ず勤務していることと、所定の時間数(=I)勤務するという条件を満たせば、始業時刻を自由に選択できるという制度である。すべての企業が同一のコアタイムを設定するものと仮定し、コアタイムの終了時刻から一日の労働時間を引いた時刻を $\bar{t}$ 、コアタイムの始まる時刻を $\bar{t}'$ とする。図4-2には、フレックスタイム制のもとでの始業時刻とコアタイムの関係を図示している。このとき労働者は、 $[\bar{t}, \bar{t}']$ の間にオフィスに到着すれば直ちに仕事を始めることができ、その場合スケジューリングコストはかからない。以下では、 $[\bar{t}, \bar{t}']$ の時間帯をフレックス通勤時間帯と呼ぶ。フレックス通勤時間帯の間は、勤務先に着く時間にかかわらず走行時間費用が一定となるというのが均衡条件になる。一方、 $\bar{t}$ よりも早い時刻に到着する労働者は、 $\bar{t}$ になるまで仕事を始めることはできないので、 $\beta(\bar{t} - t - T(t))$ に等しいスケジューリングコストを負う。この時間帯につ

いての、均衡での単位時間当たり出発数（以下では出発率と呼ぶ）は、ケースAと同様である。

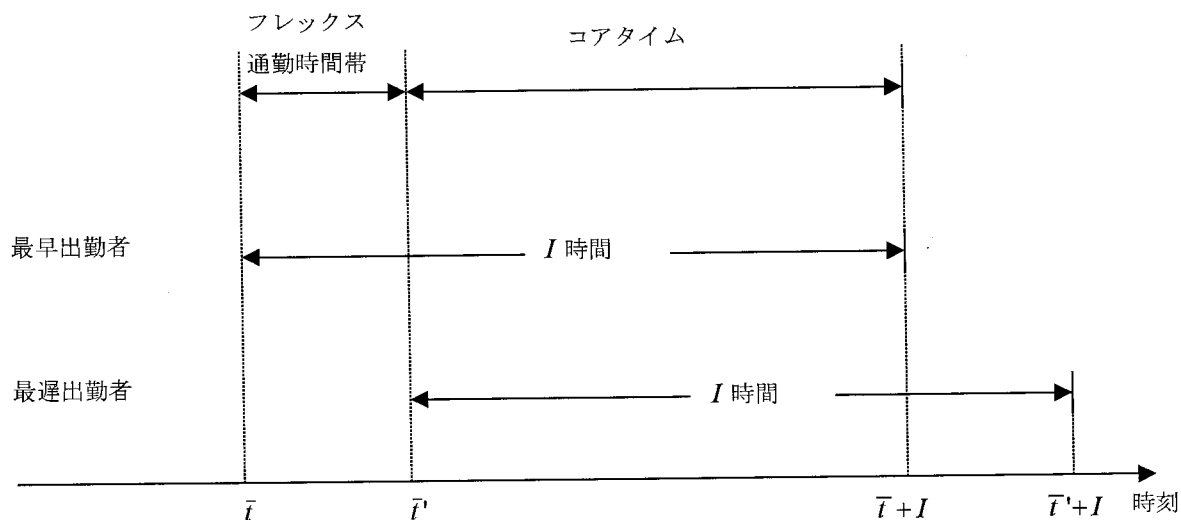


図4-2 フレックスタイム採用企業における勤務スケジュール

出発分布は、総労働者数 $N$ とボトルネック容量 $W_b$ 、およびフレックス通勤時間帯の長さ $(\bar{t}' - \bar{t})$ により異なる。すべての労働者が時間帯 $[\bar{t}, \bar{t}']$ の間にボトルネックを通過できるほどフレックス通勤時間帯が長い場合、すなわち $N \leq W_b(\bar{t}' - \bar{t})$ が満たされているとき、待ち行列は発生しない。すなわち、すべての通勤者は待ち行列とスケジューリングコストを回避できるような出発時刻を見つけることができる。一方、すべての通勤者が時間帯 $[\bar{t}, \bar{t}']$ の間にボトルネックを通過できないケース、すなわち $N > W_b(\bar{t}' - \bar{t})$ の場合、遅刻は許されないので一部の労働者は $\bar{t}$ より早い時刻に出勤する必要がある。そのような労働者は時刻 $\bar{t}$ になるまで勤務を開始することができず、スケジューリングコストを負う。一方、 $\bar{t}$ と $\bar{t}'$ の間に到着する労働者は、スケジューリングコストがかからないが、それよりも早く到着する労働者の通勤費と均衡するために、待ち行列に加わることになる。

本研究では、前者のケース（すなわちフレックスタイムの労働者が通勤して

いる間に待ち行列が形成されない)にのみ注目する<sup>9</sup>。このケースでは、通勤時間費用もスケジューリングコストもゼロとなる。すなわち、 $C^B=0$ である。 $[\bar{t}, \bar{t}']$ の間にすべての労働者が到着すること、および出発率が $W_b$ を超えないという条件を満たす分布は無数に存在する。そこで代表的なパターンとして一様分布を仮定する。すなわち、

$$Q(t) = \frac{N}{\bar{t}' - \bar{t}} \quad (4-15)$$

なお第2章や第3章で用いたような、ボトルネック以外の要因による混雑（すなわちフロー混雑）も含んだモデルでは、一様な出発分布が均衡解として得られる。ボトルネック混雑が生じない場合、走行時間が交通流率の増加関数となるので、この状況のもとでの一様な出発分布は、出発時刻に関係なく走行時間が一定であるという均衡条件を満たす唯一の解となる。その意味で上のような一様分布は現実的にも妥当である。あるいは式(4-15)が無数にある出発分布の平均と解釈することもできる。このケースではどのような出発分布であれ通勤費用がゼロであることは不変なので、今の段階では出発分布を特定化する意味はない。しかし後の4-4において企業の生産額を求めるためには上のような特定化が必要である。

#### 〔ケース C〕一部の企業がフレックスタイム制の場合

ここでは、両タイプの労働者が共存する一般的ケースについて、均衡における出発分布を求める。

タイプ2の始業時刻を $\hat{t}$ とし、 $\bar{t} < \hat{t} < \bar{t}'$ であるものとする。ケースBと同様、タイプ1の通勤者が待ち行列に遭わないケースのみを想定する。これは、 $(N_1 + N_2) \leq W_b(\bar{t}' - \bar{t})$ 、あるいは $N_1 \leq W_b(\bar{t}' - \hat{t})$ のいずれかが成立することを意味する<sup>10</sup>。このとき均衡における出発時刻分布について、可能な出発パターンは図4-3のような2通りである。また図より、タイプ1とタイプ2が同時に道路を

<sup>9</sup> フレックス通勤時間帯に待ち行列が形成されるとき均衡での出発パターンは Mun and Yonekawa (2005)に示されている。

<sup>10</sup> Mun and Yonekawa (2005)は、ケースCのもとで均衡出発分布が、フレックス通勤時間帯に待ち行列が形成される場合を含め4パターン存在することを示している。また、ここではそれぞれのパターンが均衡解として実現するための条件を具体的に導いている。

利用することがあり得ないこともわかる。それは二つのタイプの均衡条件から導かれる走行時間変動に関する条件が両立し得ないからである。すなわちケースBで説明したように、タイプ1が道路を利用する間は均衡条件として走行時間が一定とならねばならない。一方、タイプ2が利用する間の均衡条件である(4-9)によると走行時間が時間とともに増加せねばならない。また図4-3より、タイプ2の始業時刻 $\hat{t}$ 以前では、タイプ2がタイプ1よりも必ず $\hat{t}$ に近い時間帯に通勤する。そうでなければ、両タイプとも出発時刻を変更することによって通勤費用を減少できるので均衡とはならない。

ケースC1となるかC2となるかは、タイプ1と2の最早出発時刻、すなわち $\bar{t}$ と $t_1$ の関係によってきまる。ケースC1(C2)となるのは、 $\bar{t}$ が $t_1$ より早い(遅い)場合である。タイプ2の最早出発時刻 $t_1$ と最遅出発時刻 $t_2$ が次のように求められる。

$$t_1 = \hat{t} - \frac{N_2}{W_b}, \quad (4-16a)$$

$$t_2 = \hat{t} - \frac{\beta N_2}{\alpha W_b}, \quad (4-16b)$$

この2式は、ケースAの式(4-12)、(4-13)に対応する。均衡において、ケースC1およびC2が実現する条件は、それぞれ以下になる。

$$\text{ケースC1: } N_2 \leq W_b(\hat{t} - \bar{t}) \text{ and } N \leq W_b(\bar{t}' - \bar{t}) \quad (4-17a)$$

$$\text{ケースC2: } N_2 > W_b(\hat{t} - \bar{t}) \text{ and } N_1 \leq W_b(\bar{t}' - \hat{t}) \quad (4-17b)$$

図4-4には、これら二つの出発パターンと6つのパラメータ ( $W_b$ 、 $\bar{t}$ 、 $\bar{t}'$ 、 $\hat{t}$ 、 $N_1$ 、 $N_2$ ) の関係が示されている。

タイプ1は、待ち行列に遭わないので通勤時間費用を負担する必要がなく、スケジューリングコストも負わない。すなわち、均衡通勤費はゼロである ( $C_1^C = 0$ )。

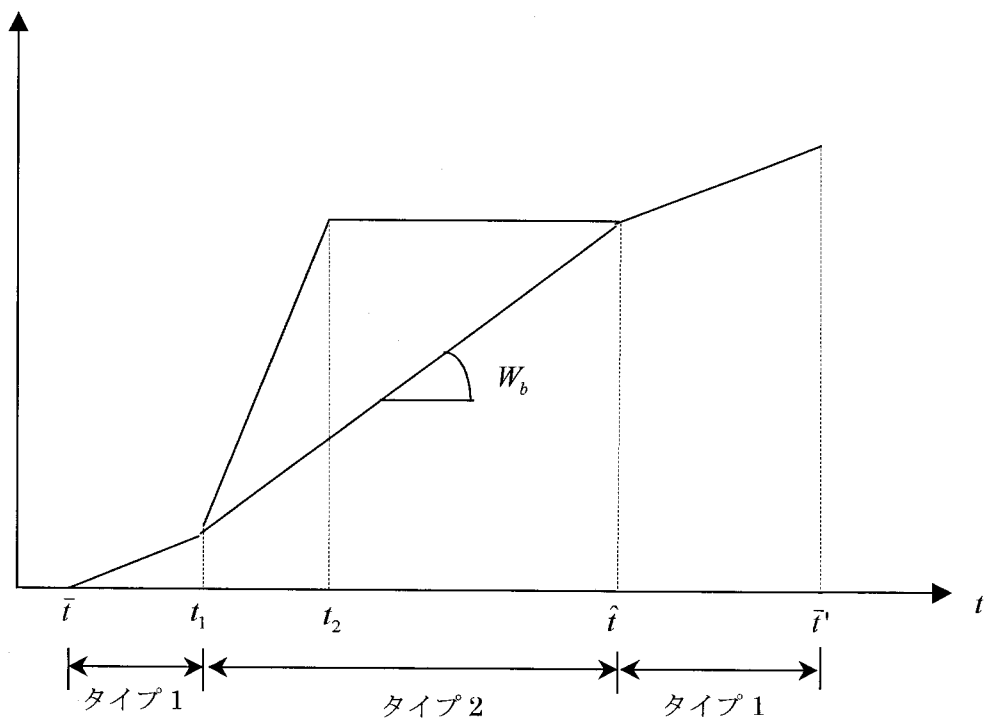
一方、タイプ2の均衡通勤費用は次のように求められる。

$$C_2^C = \frac{\beta N_2}{W_b}. \quad (4-18)$$



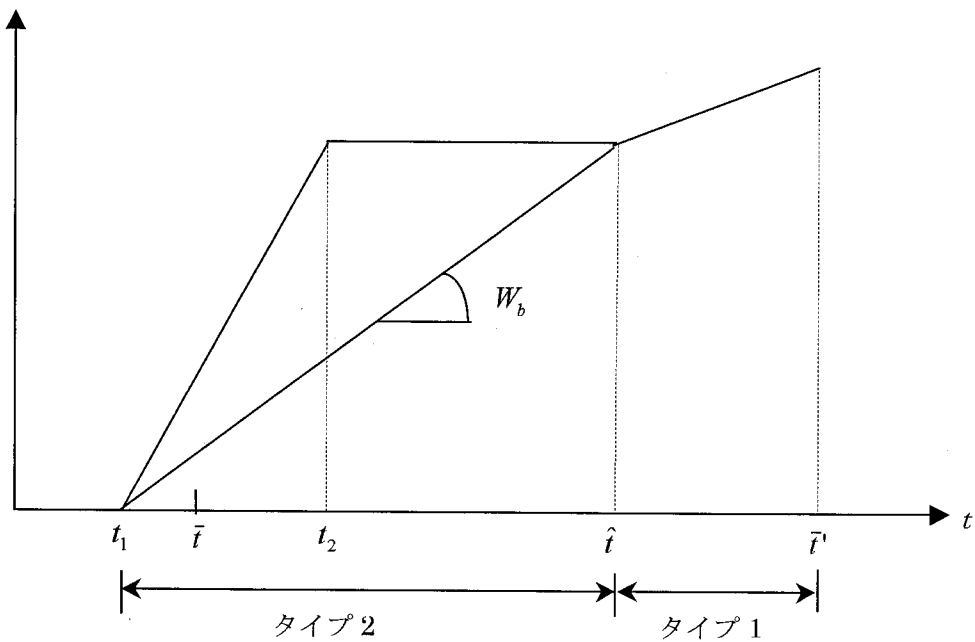


累積出発および  
到着数



ケース C1

累積出発および  
到着数



ケース C2

図 4-3 ケース C における出発パターン

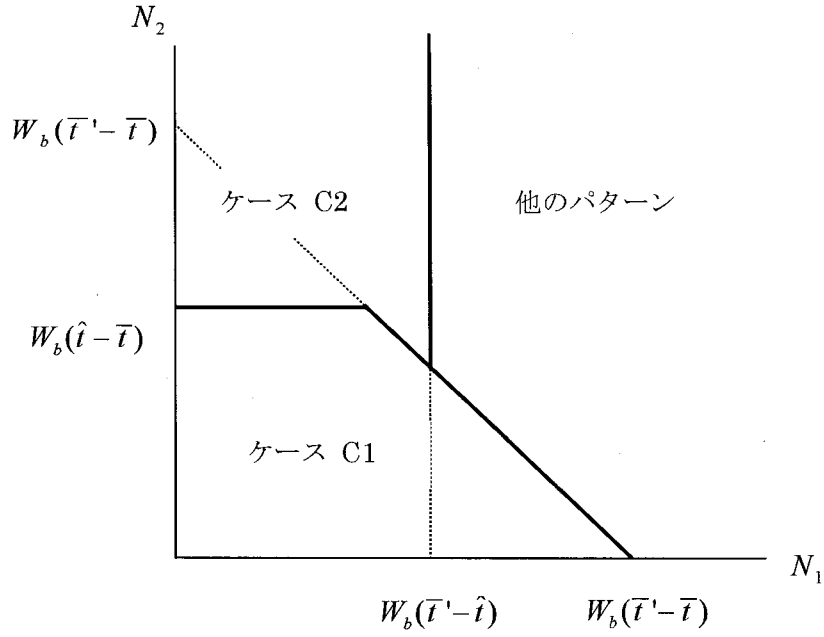


図 4-4 パラメータと出発パターン

$C_1^C = 0$ 、 $C_2^C > 0$ なので、通勤費についてはフレックスタイムの方が固定的始業時刻制よりも好ましいことが確かめられる。定義より、 $N_2 = N - N_1$ であるから、式(4-18)は、固定的始業時刻制からフレックスタイムにシフトする企業が増えることにより、タイプ2の労働者の通勤費用が減少することを意味する。これは一種の外部効果である。フレックスタイムの導入を選ぶ企業は、それが他のタイプ2企業の通勤費に及ぼす影響など考慮せずにそのような選択を行うのである。

ケースC1とC2について、タイプ1の出発率はケースBと同様の手順(式(4-15))で求められる。

$$\text{ケースC1 : } Q(t) = \frac{N_1}{\bar{t}' - \bar{t} - \frac{N_2}{W_b}}, \text{ for } \bar{t} \leq t \leq t_1 \text{ or } \hat{t} \leq t \leq \bar{t}' \quad (4-19a)$$

$$\text{ケースC2 : } Q(t) = \frac{N_1}{\bar{t}' - \hat{t}}, \text{ for } \hat{t} \leq t \leq \bar{t}'. \quad (4-19b)$$

これら出発率はいずれも $W_b$ よりも低いので、これがそのままCBDへの到着率

になる。

タイプ2の出発率についてはケースAと同様であり、式(4-7)により求められる。

#### 4-4 フレックスタイムが生産性に与える影響

企業はCBDに立地することにより、他の企業とのコミュニケーションに伴う集積の経済を享受する。都市経済学では、同じ都市に立地する企業の数が多いほど集積の経済効果によって企業の生産性が上昇するという仮定にもとづいたモデルが多く開発されてきた。Henderson (1981)は、このタイプのモデルに時間の次元を導入し、ある時刻における企業の生産性はその時刻に都市で業務を行っている労働者数に依存すると仮定した。本研究でも同様のモデルを用いてフレックスタイムが都市の生産性に与える影響を分析する。

CBDには多くの企業が立地しており、各企業は規模に関して収穫一定で同一の生産技術を有すると仮定する。このとき労働者数は企業数の代理指標となる。時刻 $t$ における労働者一人当たり生産額は、次のような瞬時的生産関数で求められる。

$$y(t) = g(n(t))a, \quad (4-20)$$

ここに $a$ は定数、 $n(t)$ は時刻 $t$ にこの都市で業務を行っている総労働者数である。また $g(n(t))$ は集積の経済を表す関数であり、 $g' > 0, g'' < 0$ であると仮定する。

以下では、前節で定義された三つのケース（A、B、C）について、企業の生産額を求める。

##### 〔ケース A〕 すべての企業が固定的な始業時刻の場合

ケースAのもとでは、すべての労働者は $\hat{t}$ に業務を開始し、 $\hat{t}+I$ に終了する。また一日を通じて都市内で業務を行っている労働者数は $N$ である。このとき一日を通した労働者一人当たり生産額 $Y^A$ は、瞬時的生産関数を $\hat{t}$ から $\hat{t}+I$ まで積分することにより得られる。

$$Y^A = \int_{\hat{t}}^{\hat{t}+I} a \cdot g(N) dt = aI g(N) \quad (4-21)$$

〔ケース B〕 すべての企業がフレックスタイム制の場合

4-3で述べたように、本稿では  $N \leq W_b(\bar{t}' - \bar{t})$  のケースについてのみ検討する。この場合、フレックス通勤時間帯における勤務先への到着率は式(4-15)により求められる出発率に等しい。労働者はオフィスに到着するとただちに仕事を始めるため、都市内で業務を行っている労働者数は時間とともに変動し、したがって一人当たり生産額も変動する。時刻  $t$  に勤務中の労働者の比率は平均で  $\frac{n(t)}{N}$

なので、時刻  $t$  における一人当たり生産額は  $\frac{n(t)}{N}g(n(t))a$  である。したがって一日を通した労働者一人あたり生産額  $Y^B$  は、

$$Y^B = \int_{\bar{t}}^{\bar{t}'} \left\{ \frac{n(t)}{N} g(n(t)) a \right\} dt + (\bar{t}' + I - \bar{t}) g(N) a + \int_{\bar{t}'+I}^{\bar{t}'+I} \left\{ \frac{n(t)}{N} g(n(t)) a \right\} dt. \quad (4-22)$$

となる。右辺第1項は朝の出勤時間帯における生産、第2項はコアタイムにおける生産、そして第3項は帰宅時間帯における生産額である。

朝の出勤時間帯に業務についている労働者数は、式(4-15)の出発率を積分することにより次のように計算される。

$$n(t) = \int_{\bar{t}}^t Q(t) dt = \frac{N}{\bar{t}' - \bar{t}} (t - \bar{t}), \quad \text{for } \bar{t} \leq t \leq \bar{t}'. \quad (4-23a)$$

また夕方の帰宅時については、次式のようになる。

$$n(t) = N - n(t - I) = \frac{N}{\bar{t}' - \bar{t}} (\bar{t}' + I - t), \quad \text{for } \bar{t}' + I \leq t \leq \bar{t}' + I. \quad (4-23b)$$

〔ケース C〕 一部の企業がフレックスタイム制の場合

時刻  $t$  にこの都市で業務を行っているタイプ1、2の労働者数を、それぞれ  $n_1(t)$ 、 $n_2(t)$  と表わすことにする。またタイプ1、2の労働者一人当たり生産額を、それぞれ  $Y_1^C$ 、 $Y_2^C$  と表すと、それらは次のように計算される。

$$Y_1^C = \int_{\bar{t}}^{\bar{t}'+I} \left[ g(n_1(t) + n_2(t)) \frac{n_1(t)}{N_1} a \right] dt, \quad (4-24a)$$

$$Y_2^C = \int_{\bar{t}}^{\bar{t}+I} [g(n_1(t)+n_2(t))a] dt. \quad (4-24b)$$

ここで、式(4-24a)と(4-24b)の積分区間が異なっていることに注意されたい。タイプ1（フレックスタイム）の企業では、労働者は勤務先に到着してすぐに業務を始める。タイプ1（フレックスタイム）の労働者は朝 $\bar{t}$ から $\bar{t}$ の間に勤務先に到着し、夕方は $\bar{t}+I$ から $\bar{t}+I$ の間に帰宅するため、積分区間は $\bar{t}$ から $\bar{t}+I$ となる。一方、タイプ2（固定的始業時刻制）に勤める労働者は、 $\hat{t}$ より前に着いたり、 $\hat{t}+I$ 以降まで残っていたとしても、全員が $\hat{t}$ から $\hat{t}+I$ まで業務を行う。

$n_1(t)$ 、 $n_2(t)$ の関数形は出発パターンによって決まる。これは、前節で求めたケースC1とC2に対応する。詳細は付論4-Aに示してある。

#### 4-5 均衡におけるフレックスタイム導入企業数

##### 4-5-1 端点解の分析

ここでは式(4-3b)、(4-3c)に示した二通りの端点解（それぞれケースA、B）に注目する。これら端点における両タイプの私的純便益を比較することにより、企業が自発的にフレックスタイムを実施するような状況が均衡解として実現するかどうかを調べる。

以下では $\hat{t} = \frac{\bar{t}'+\bar{t}}{2}$ を仮定する。これはフレックス通勤時間帯が従来の固定的始業時刻を中心として前後へ対称的に広がることを意味する。実際に行われている、ほとんどのフレックスタイムの事例についてこの仮定が妥当する。たとえば固定的始業時刻が9時に対し、フレックスタイムでは8時から10時までの間に出勤すれば良いという場合がそうである。さらに、集積の経済を表す関数の形を次のように特定化する。

$$g(n) = n^\sigma \quad 0 < \sigma < 1. \quad (4-25)$$

式(4-21)、(4-22)に式(4-25)を適用すると、ケースAとBの生産額は、それぞれ、

$$Y^A = a \cdot N^\sigma I \quad (4-26a)$$

$$Y^B = a \cdot N^\sigma (I + \bar{t} - \bar{t}') + \frac{2a \cdot N^\sigma (\bar{t}' - \bar{t})}{(2 + \sigma)}. \quad (4-26b)$$

となる。このことから、ただちに、

$$Y^A - Y^B = \frac{a \cdot \sigma \cdot N^\sigma \cdot (\bar{t}' - \bar{t})}{2 + \sigma} > 0.$$

が得られる。すなわち、フレックスタイムのもとでの生産額は固定的始業時刻制の場合より小さくなる。

まず、すべての企業が固定的始業時刻制を導入している場合（ケースA）について検討する。 $N_1 = 0, N_2 = N$ において $(Y_1 - C_1) - (Y_2 - C_2)$ を評価すると、以下の関係が得られる（導出については付論4-Bを参照）。

$N < W_b(\hat{t} - \bar{t})$ の場合

$$(Y_1 - C_1) - (Y_2 - C_2) < 0 \Leftrightarrow \frac{\beta N}{W_b} - \frac{a(\bar{t}' - \bar{t})(\bar{t}' - \bar{t} - 2N/W_b)}{4(\bar{t}' - \bar{t} - N/W_b)} N^\sigma < 0 \quad (4-27a)$$

$N \geq W_b(\hat{t} - \bar{t})$ の場合

$$(Y_1 - C_1) - (Y_2 - C_2) < 0 \Leftrightarrow \frac{\beta N}{W_b} - \frac{1}{2} a(\bar{t}' - \hat{t}) N^\sigma < 0 \quad (4-27b)$$

$(Y_1 - C_1) - (Y_2 - C_2) < 0$ は、 $N_1 = 0, N_2 = N$ が均衡解として実現するための条件である。逆にこの関係が成り立たないなら、すなわち $(Y_1 - C_1) - (Y_2 - C_2) > 0$ のとき、 $N_1 = 0, N_2 = N$ は均衡とはならず、企業はこの状況から逸脱する（すなわちフレックスタイムを導入する）ことにより私的純便益を増加させることができる。このことは企業が自発的に固定的始業時刻制からフレックスタイムへ移行するインセンティブを持つことを意味する。式(4-27)に基づいて、このケースが実現する可能性を調べることにより、次の命題が得られる。

**命題4-1** 初期にすべての労働者が固定的始業時刻であった場合（すなわち $N_1 = 0, N_2 = N$ ）、そこから自発的にフレックスタイムに移行する企業が出現するような状況は、(i)スケジューリングコスト $\beta$ が大きい、(ii)ボトルネック容量 $W_b$ が小さい、(iii)集積の外部効果 $\sigma$ が小さい、そして(iv)総労働者数 $N$ が大きい場合に実現する。

次にもう一方の端点解である、すべての企業がフレックスタイム制を導入した場合（ケースB）について検討する。均衡条件の式(4-3b)が成り立つかどうかを調べると、 $N_1=N, N_2=0$ のとき、以下の式が得られる（導出については付論4-Cを参照）。

$$(Y_1 - C_1) - (Y_2 - C_2) = \frac{a \cdot N^\sigma (\bar{t}' - \bar{t}) (2 + \sigma - 2^{\sigma+1})}{2^{\sigma-1} (2 + \sigma) (1 + \sigma)} < 0. \quad (4-28)$$

上の不等式は、次のことを意味する。

**命題4-2** すべての企業がフレックスタイムを実施するような状況（すなわち  $N_1=N, N_2=0$ ）は均衡解として実現しない。

上の二つの命題より、フレックスタイムを実施する企業が存在するような均衡解が存在しうること、そしてそれは内点解としてのみ実現することがわかる。

#### 4-5-2 均衡解のパターン

内点解の場合（ケースC1、C2）、4-3と4-4で示したように、各タイプの生産額および通勤費用を計算する式は複雑であり、解析的に均衡解を求めることは困難である。以下では仮想的パラメータを用いた数値計算により均衡解を分析することにする。

数値計算に用いるパラメータ値を次のように設定する。

$$\beta = 1900, \quad I = 8, \quad \hat{t} = 9, \quad \bar{t} = 8.5, \quad \bar{t}' = 9.5, \quad W_b = 3000, \quad a = 100$$

すなわち労働者は8時間勤務し、固定的始業時刻の場合は9時に業務が始まるが、フレックスタイムの場合は8時30分から9時30分までの間に出社すればよい。

均衡解のパターンは、図4-5に示すような三通り存在する。図は $N=2000$ の場合について示しているが、他のパラメータの組み合わせについても、この三通り以外のパターンは見つからなかった。各図において、タイプ1（タイプ2）の労働者数は右端（左端）から測った横軸の座標値で表される。図に描かれた二つの曲線は、パラメトリックに与えた $(N_1, N_2)$ に対し、タイプ1、2の企業が達成する私的純便益をプロットしたものである。タイプ1の私的純便益曲線は $N_2=1500$ で屈折しているが、それはこの点で通勤パターンが変化するためである。



る。すなわち上に示したパラメータ値のもとでは、 $N_2 \leq 1500$ のときにケースC1となり、 $N_2 > 1500$ のときC2となる（式(4-17)を参照のこと）。図中の矢印は、均衡に向けて調整する方向を示している。パターン1（図4-5(a)）では、あらゆる $(N_1, N_2)$ の範囲でタイプ2の私的純便益が上回っているので、均衡においてはすべての企業が固定的始業時刻を採用する。パターン2（図4-5(b)）では、複数の均衡解が生じる。この場合、私的純便益は内点均衡においてより大きい、すなわち一部の企業でフレックスタイムを実施した方が経済厚生は大きい。しかしこのような内点解を市場メカニズムにより実現するためには、初期解が図4-5(b)の点Sよりも左側にある必要がある。たとえば政府関係の職場で率先してフレックスタイムを実施することにより初期解を左側に移動させれば、市場の力で左の均衡解を達成できる可能性がある。パターン3は多数の労働者がフレックスタイムで通勤するパターンが唯一の均衡解となるケースである。命題4-2で示したように、均衡は図の左端では達成されない。

均衡解に対応する経済厚生水準は、私的純便益の和である社会的総余剰によって評価できる。

$$S(N_1, N_2) = N_1(Y_1 - C_1) + N_2(Y_2 - C_2). \quad (4-29)$$

ここで $N_1 = N - N_2$ より $S(N - N_2, N_2)$ と書けるので、これを $N_2$ で微分し $N_2 = 0$ で評価すると、次が得られる。

$$\left. \frac{dS}{dN_2} \right|_{N_2=0} = \frac{2^{-\sigma}(2^{1+\sigma} - 2 - \sigma)\{k(\bar{I}' - \bar{I}) - N\}aN^{1+\sigma}}{k(2+\sigma)} > 0$$

上の不等式より次の命題を得る。

**命題4-3** すべての企業がフレックスタイムを実施するような状況（ $N_1 = N, N_2 = 0$ ）で社会的余剰が最大化されることはない。

命題4-3を考慮すると、労働者のタイプ別構成 $(N_1, N_2)$ と社会的総余剰の関係は、図4-6に示すような三通りのパターンに分類される。具体的には

パターンR: すべての企業が固定的始業時刻制を採用した場合に社会的総余剰が最大化される、

パターンM:通勤パターンの変化する点、 $N_2 = \frac{W_b(\bar{t}' - \bar{t})}{2}$ で社会的余剰が最大化、

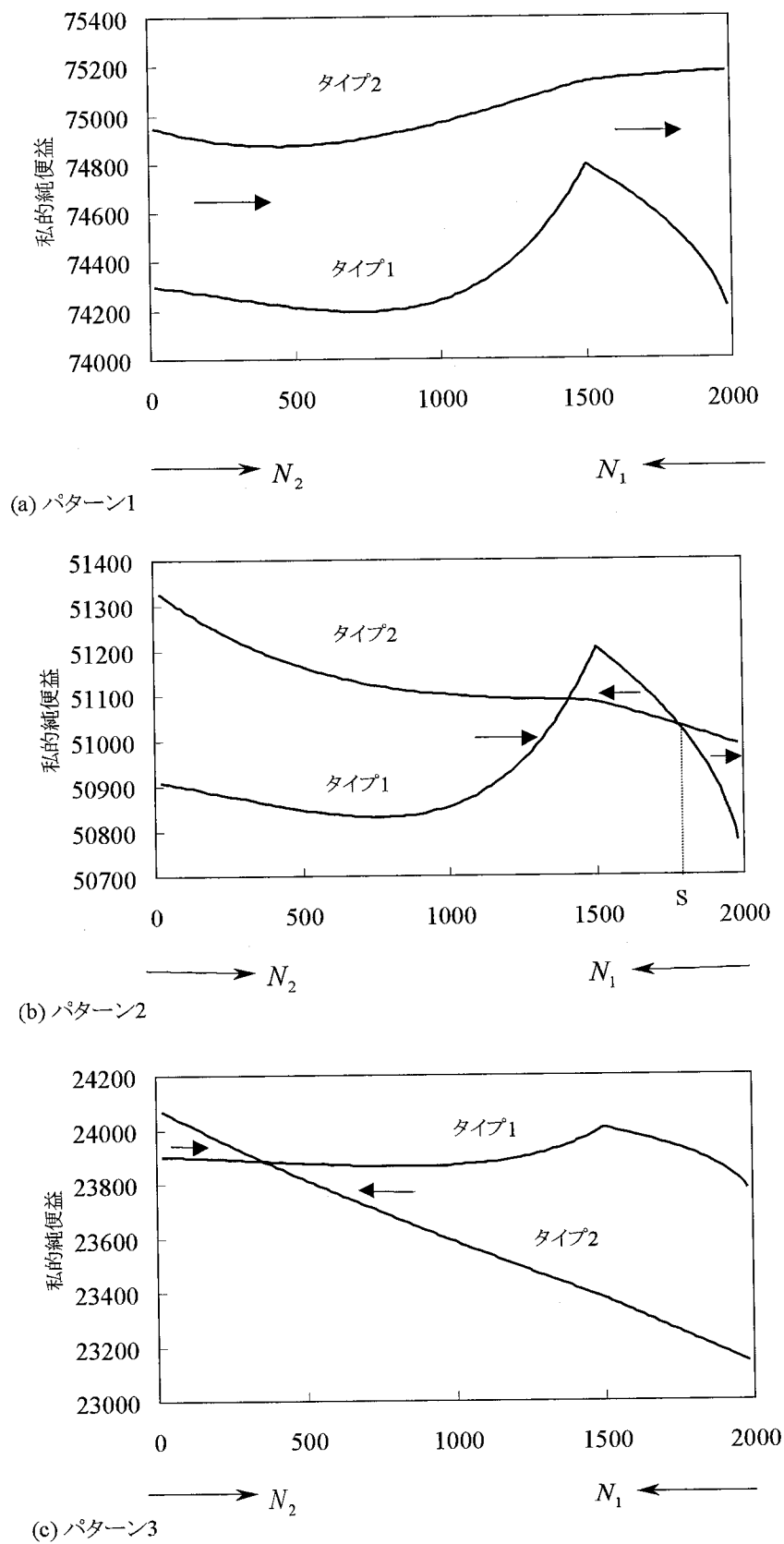


図4-5 均衡解のパターン

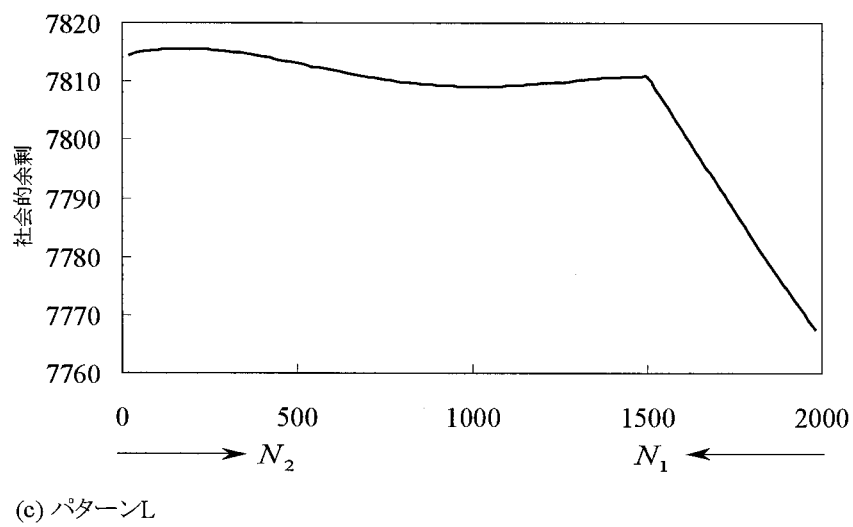
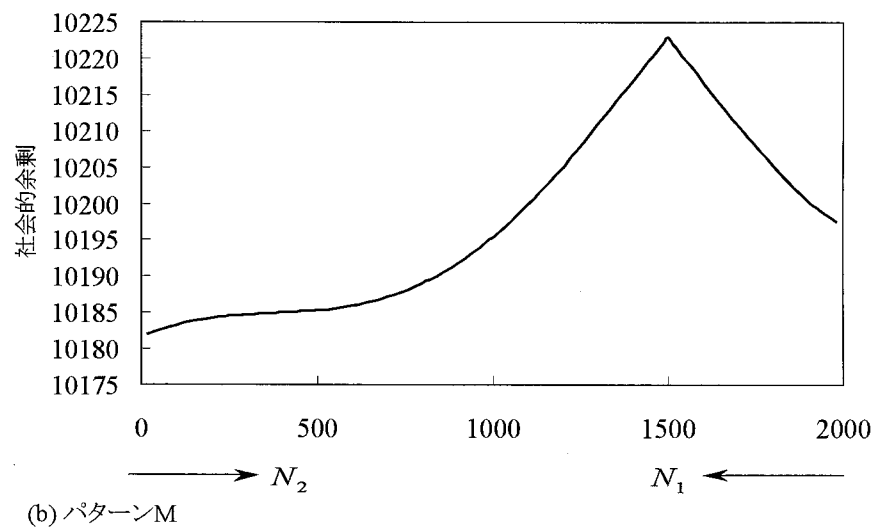
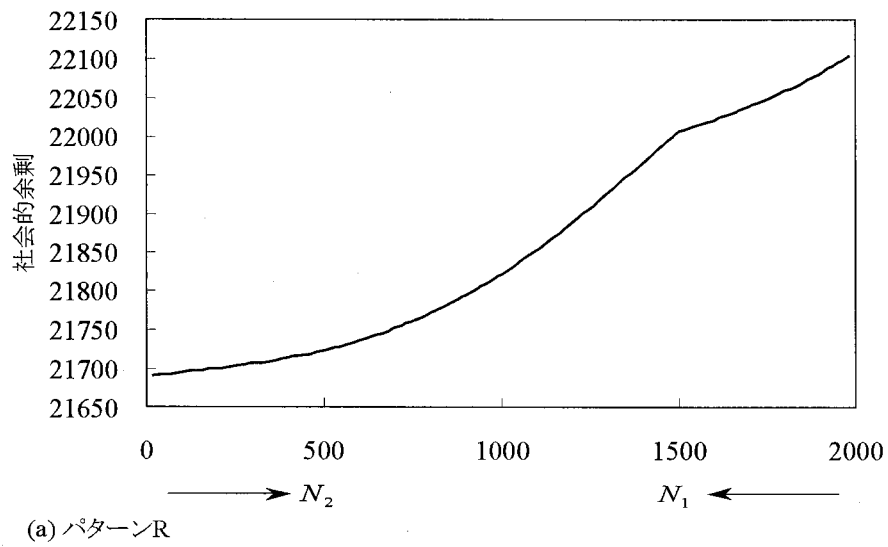


図4-6 社会的余剰のパターン

パターンL:  $N_2=0$  と  $N_2=\frac{W_b(\bar{t}'-\bar{t})}{2}$  の中間点で社会的余剰が最大化。

図4-7には、それぞれの均衡解のパターンが生じるパラメータの範囲を示している。図でたとえば1-Rとなっているのは、均衡解がパターン1で、社会的総余剰がパターンRになるケースを意味する。この場合、均衡においてはすべての企業が固定的始業時刻制を採用しており、このとき社会的総余剰は均衡点で最大となっている。このパターンは集積の経済効果の強さを表すパラメータ $\sigma$ が大きく、通勤者数 $N$ が小さいときに実現する。この結果は命題4-1と整合している。なお、 $N < \frac{W_b(\bar{t}'-\bar{t})}{2}$  のとき、ケースC1の通勤パターンのみなので、均衡解のパターン2と社会的余剰のパターンMは存在しない<sup>11</sup>。

1-R以外の領域では、社会的総余剰が最大化される点と均衡解は一致しない。多くの場合、均衡においてフレックスタイムを採用する企業の割合は（社会的総余剰が最大化されるという意味での）最適水準より小さくなっている。例外は2-Mと3-Mで、これらの領域ではフレックスタイム労働者の割合が最適水準よりも大きい。

図4-8(a)には、スケジューリングコストの大きさを表すパラメータ $\beta$ が変化する場合に各タイプの私的純便益がどのように変化するかを示している。なお図における●印は均衡解の位置を表している。人々の時間価値の増大にともなってスケジューリングコストは大きくなるものと考えられるので、 $\beta$ を小さい値から徐々に大きくする。初期の段階では $\beta$ の値が非常に小さく、 $\beta=1500$ としよう。

---

<sup>11</sup> 図4-7では、 $N < 1500$  の場合が該当する。

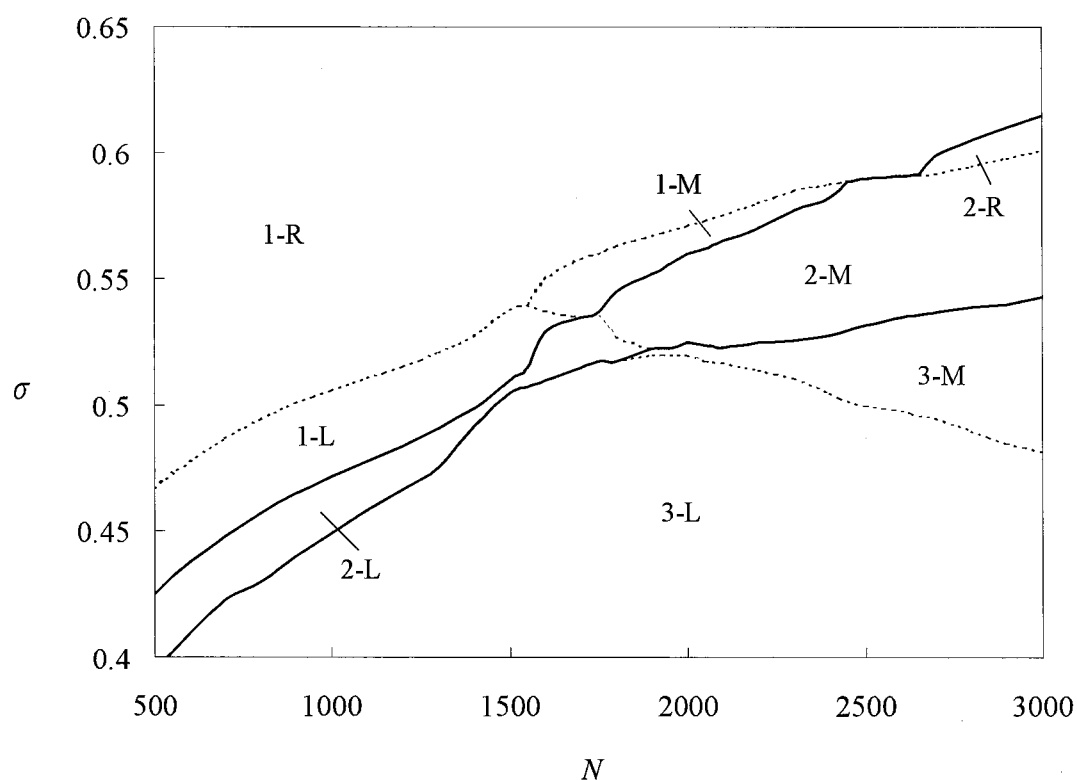
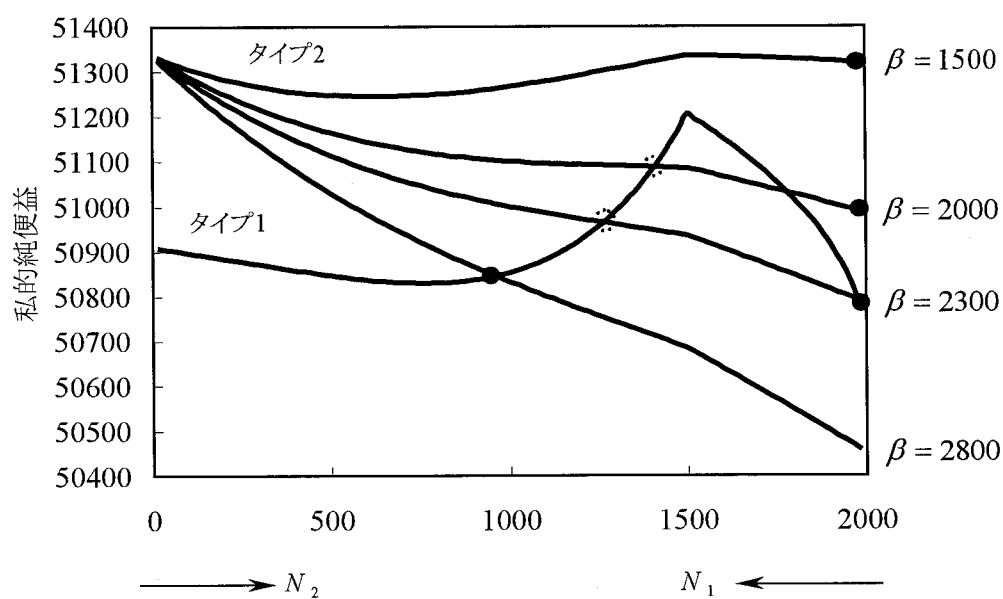
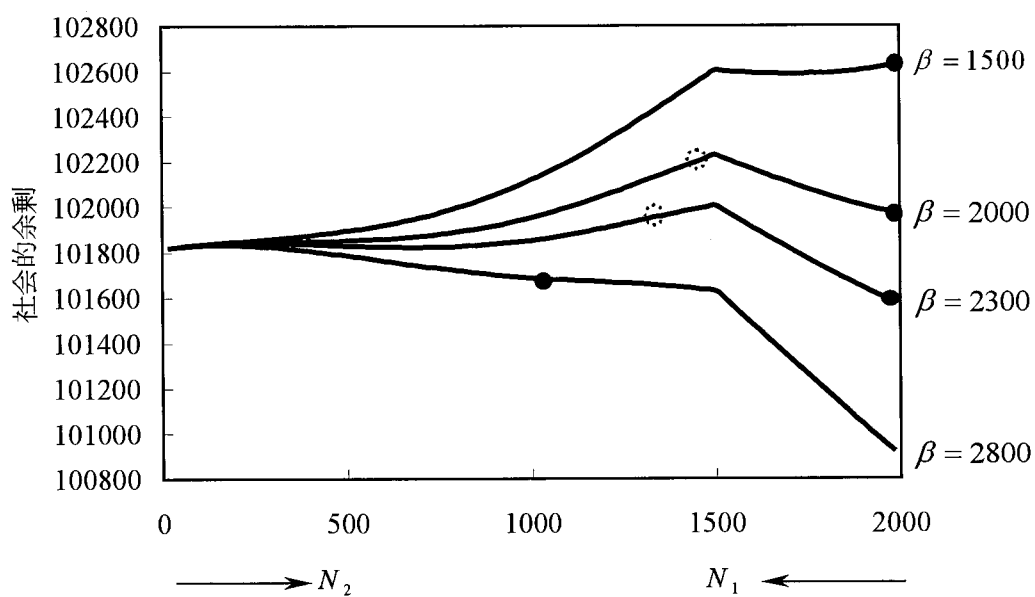


図4-7 パラメータと均衡解および最適解のパターン

この段階では、すべての企業が固定的始業制を実施している場合に均衡が得られる。 $\beta$ を大きくするとタイプ2の私的純便益曲線が時計回りに回転する。一方、タイプ1はフレックスタイムでスケジューリングコストがかからないので曲線の位置は変わらない。 $\beta$ がある一定値（図ではおよそ1700）を超えると、 $N_2=1400$ の周辺にもう一つの均衡解が出現する（図中○で印した点）。図4-8(b)より、新たに出現した内点均衡の方が初期の均衡点より社会的総余剰の値は大きいことがわかる。しかし初期の均衡点が右端にあるため、内点均衡は実現しない。このことは、政府が何らかの介入を行い初期均衡を左方へと誘導することにより厚生が改善されることを示唆している。パラメータ $\beta$ の値がさらに大きくなりある閾値（図ではおよそ2300）を超えると、右端の端点から左の方の内点均衡にジャンプする。



(a) 私的純便益と均衡解の位置



(b) 社会的余剰と均衡解の位置

図4-8 スケジューリングコストの変化による解の変化

### 4-5-3 混雑料金の影響

一部の企業がフレックスタイムを実施すると、そのような企業に勤める労働者は混雑を回避するよう出発時刻（始業時刻）を調整するので、交通混雑は改善される。しかし、命題4-2より、すべての企業がフレックスタイムを実施するような均衡は達成されない。さらに、タイプ2の企業に勤める労働者の通勤時間帯には待ち行列が存在する。待ち行列がもたらす厚生損失を解消するためには混雑料金を導入する必要がある。以下では、混雑料金の実施が経済厚生に及ぼす効果を調べることにする。

最適な混雑料金は、出発率をボトルネック容量 $W_b$ に等しくなるように誘導することで、待ち行列の形成を防止する。第3章の3-3-2で示したように、時刻 $t$ における最適な料金 $\tau(t)$ は、次の式で計算される。

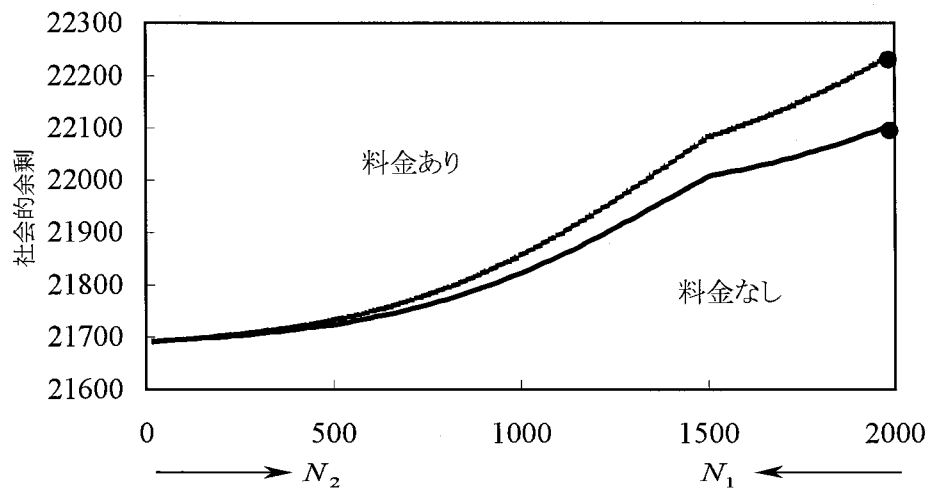
$$\tau(t) = \beta(t - t_1), \quad (t_1 \leq t \leq \hat{t}), \quad (4-30)$$

ここに、 $t_1$ はタイプ2の最初の通勤者が出発する時刻であり、式(4-16)より得られる。この料金システムのもとでは、料金が存在しない場合と同様、CBDへの到着率がボトルネック容量 $W_b$ に等しくなる。料金を導入しても到着率が変わらないということは、料金が生産性に影響を与えないことを意味している。また第3章の3-3-2で示したように、料金を導入しても均衡における個人の通勤費は変わらない。したがって、混雑料金は、両タイプの私的純便益および均衡解に影響を与えない。影響を受けるのは社会的総余剰の水準のみで、待ち行列による厚生損失の減少分に等しい額の料金収入が社会にもたらされる。総料金収入 $\rho$ は次式で計算される。

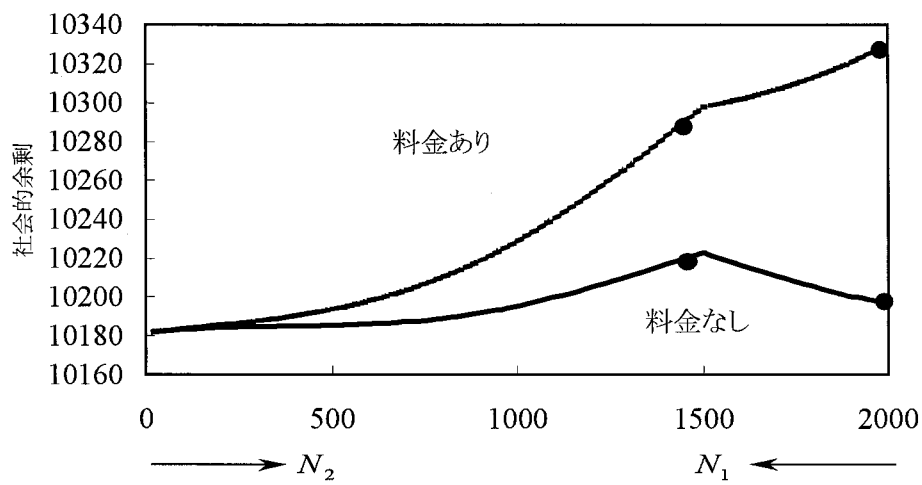
$$\rho = \int_{t_1}^{\hat{t}} \tau(t) \cdot W_b dt = \int_{t_1}^{\hat{t}} \beta(t - t_1) W_b dt = \frac{\beta N_2^2}{2W_b}. \quad (4-31)$$

図4-9は、3パターンの均衡において混雑料金が社会的総余剰に与える影響を示している。各図で $\rho$ は二つの曲線の垂直方向の距離に等しい。均衡解の位置は、●印で示されている。

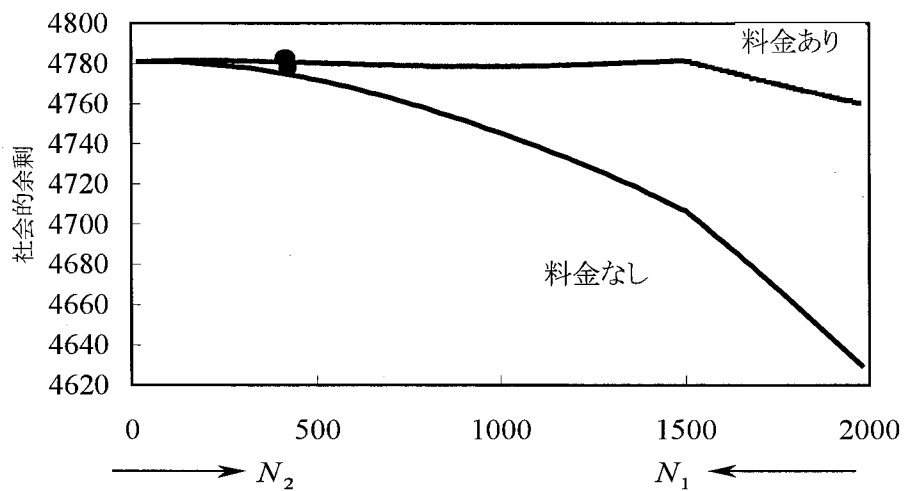




(a)  $N = 2000, \sigma = 0.65$



(b)  $N = 2000, \sigma = 0.55$



(c)  $N = 2000, \sigma = 0.45$

図4-9 混雑料金の効果

式(4-31)より、社会的総余剰の増加分はタイプ2の労働者数  $N_2$  の増加にともなって大きくなる。したがって、図4-9(a)のように、混雑料金の収入は、フレックスタイムの労働者数が小さいときに相対的に大きくなる。図4-9(b)のように複数の均衡点が存在する場合、経済厚生観点から見た解の順位は、料金が存在する場合としない場合で異なっている。混雑料金が徴収される場合、右端の均衡解（フレックスタイムを導入している企業が存在しないケース）で、内点解（フレックスタイムを導入している企業が存在するケース）よりも高い水準の経済厚生が達成される。このことは、混雑料金を徴収している場合、フレックスタイムの導入を促すような政策は不要であるということの意味する。すなわち、ある状況下では、フレックスタイムと混雑料金は代替的な政策となる。図4-9(c)の場合（フレックスタイム導入率が高いケース）、混雑料金がもたらす社会厚生の増加は微々たるものである。これは、フレックスタイムを採用する企業の割合が高い場合、混雑の水準がかなり小さくなっているためである。この場合、混雑料金徴収の費用が大きいと、料金制導入は経済厚生を低下させるかも知れない。

#### 4-6 結論

本章では、交通混雑と都市の生産性とのトレード・オフを考慮してフレックスタイムを採用する企業数を内生的に求めるモデルを提示した。集積の経済に対する依存度に比べて交通混雑による費用が大きい場合、企業が自発的にフレックスタイムを導入する可能性があることを示した。しかしすべての企業がフレックスタイムを導入するような状況は、均衡解として実現することはなく、また社会的にも最適ではない。ほとんどの場合、フレックスタイムの実施状況は社会的に効率的な水準よりも低い水準に留まっている。

このモデルでは複数の均衡解が生じる。一つの解は一部の企業がフレックスタイムを導入するが、もう一つの解では導入する企業が皆無である。前者の均衡解の方がより高い経済厚生水準を達成できるにもかかわらず、初期のフレックスタイム労働者比率がある閾値以上にならない限り後者の解が持続する。このことは、官公庁でのフレックスタイム導入や実施企業に対する補助など、

フレックスタイムの労働者比率を高める政策的介入の必要性を示唆している。その比率が閾値以上にさえなれば、市場メカニズムにより企業がフレックスタイムを採用する状況が均衡解として持続しうる。

さらにここでは混雑料金の効果も調べた。混雑料金の実施はフレックスタイムを実施する企業が少ない場合には有効である。上述の複数均衡解の場合、混雑料金の有無によって、フレックスタイムに関する政策的含意が変化する。すなわち混雑料金が実施される状況では、フレックスタイムを採用する企業が存在するような解に誘導する政策は不要である。その意味でもフレックスタイムは混雑料金が実施できない状況での次善の政策なのである。

#### 付論4-A: 時刻ごとのタイプ別労働者数

##### ケースC1:

図4-3(a)には、タイプ1の労働者が、 $[\bar{t}, t_1]$ と $[\hat{t}, \bar{t}']$ の時間帯に分かれて到着することが示されている。そして、到着率は式(4-19a)に与えられている。タイプ1の労働者は到着すると直ちに業務を始めるため、フレックス通勤時間帯のある時刻 $t$ に勤務中の労働者数はその時刻までに到着した人数に等しい。これは $\bar{t}$ から $t$ までの出発率（＝到着率）を積分することにより求められる。

$$n_1(t) = \int_{\bar{t}}^t Q(s) ds. \quad (4A-1)$$

なお、タイプ2の労働者が通勤する時間帯である $[t_1, \hat{t}]$ の間は、タイプ2の通勤者のみが道路を利用するため、 $n_1(t)$ は一定である。また、コアタイム $[\bar{t}', \bar{t}+I]$ では、 $n_1(t) = N_1$ となる。これらをまとめると、 $n_1(t)$ は次のようになる。

$$n_1(t) = \begin{cases} \frac{N_1}{\bar{t}' - \bar{t} - \frac{N_2}{W_b}}(t - \bar{t}) & (\bar{t} < t < \hat{t} - \frac{N_2}{W_b}) \\ \frac{N_1}{\bar{t}' - \bar{t} - \frac{N_2}{W_b}}(\hat{t} - \frac{N_2}{W_b} - \bar{t}) & (\hat{t} - \frac{N_2}{W_b} < t < \hat{t}) \\ \frac{N_1}{\bar{t}' - \bar{t} - \frac{N_2}{W_b}}(t - \frac{N_2}{W_b} - \bar{t}) & (\hat{t} < t < \bar{t}') \\ N_1 & (\bar{t}' < t < \bar{t}' + I) \\ \frac{N_1}{\bar{t}' - \bar{t} - \frac{N_2}{W_b}}(\bar{t}' + I - \frac{N_2}{W_b} - t) & (\bar{t}' + I < t < \hat{t} + I - \frac{N_2}{W_b}) \\ \frac{N_1}{\bar{t}' - \bar{t} - \frac{N_2}{W_b}}(\bar{t}' - \hat{t}) & (\hat{t} + I - \frac{N_2}{W_b} < t < \hat{t} + I) \\ \frac{N_1}{\bar{t}' - \bar{t} - \frac{N_2}{W_b}}(\bar{t}' + I - t) & (\hat{t} + I < t < \bar{t}' + I) \end{cases} \quad (4A-2)$$

一方、タイプ2の労働者は $[t_1, \hat{t}]$ の時間帯に続々と到着するが、業務は始めずに待機して、時刻 $\hat{t}$ に全員が一斉に業務を開始するため、 $n_2(t)$ は次のようになる。

$$n_2(t) = \begin{cases} 0 & (\bar{t} < t < \hat{t}) \\ N_2 & (\hat{t} < t < \hat{t} + I) \\ 0 & (\hat{t} + I < t < \bar{t}' + I) \end{cases} \quad (4A-3)$$

ケースC2：

上の場合と同様の手順で、次を得る。

$$n_1(t) = \begin{cases} \frac{N_1}{\bar{t}' - \hat{t}}(t - \hat{t}), & (\hat{t} \leq t \leq \bar{t}') \\ N_1, & (\bar{t}' < t \leq \hat{t} + I) \\ \frac{N_1}{\bar{t}' - \hat{t}}(\bar{t}' + I - t), & (\hat{t} + I < t \leq \bar{t}' + I) \end{cases} \quad (4A-4)$$

$$n_2(t) = \begin{cases} N_2 & (\hat{t} < t < \hat{t} + I) \\ 0 & (\hat{t} + I < t < \bar{t}' + I) \end{cases} \quad (4A-5)$$

付論4-B: 式(4-27)の導出

すべての企業がタイプ2、すなわち固定的始業時刻制を導入している場合、

一人当たり生産額は式(4-26a)の  $Y^A$  として与えられている。また、通勤費は式(4-14)の  $C^A$  である。したがって、タイプ2の私的純便益は、

$$Y_2 - C_2 = aN^\sigma I - \frac{\beta N}{W_b}$$

となる。このとき、ある企業がフレックスタイムを導入したとする。この企業の規模は小さいので、この行動が  $n_1(t)$  と  $n_2(t)$  に与える影響は無視できる。この企業の労働者は時刻  $\hat{t}$  に働き始める必要はなく、 $\hat{t}$  より早く（または遅く）始めてもかまわない。彼らは、タイプ2の通勤者が道路を利用している時間帯

$\left[\hat{t} - \frac{N}{W_b}, \hat{t}\right]$  には待ち行列が存在するので、それを避けるように出発時刻を選択

する。このとき  $C_1 = 0$  である。4-3で示したように、パラメータ値に依存して二通りの出発分布（ケースC1およびC2）が存在する。出発分布の相違は通勤費用には影響を与えないが、各時刻における労働者数が変わってくるので、一日あたりの生産額には影響する。

ケースC1について、式(4A-2)と(4A-3)を(4-24a)に代入し、 $N_1 = 0, N_2 = N$  とおくことで、次を得る。

$$Y_1 = aN^\sigma I - \frac{a(\bar{t}' - \bar{t})(\bar{t}' - \bar{t} - 2N/W_b)}{4(\bar{t}' - \bar{t} - N/W_b)} N^\sigma$$

上の結果を  $(Y_1 - C_1) - (Y_2 - C_2)$  に代入することにより(4-27a)が求められる。

ケースC2については、(4A-4)と(4A-5)を代入し、上と同様の手順により(4-27b)が得られる。

#### 付論4-C: 式(4-28)の導出

すべての企業がフレックスタイム制を導入している場合、一人当たり生産額は式(4-26b)の  $Y^B$  として与えられている。また通勤費用はゼロである。したがって、タイプ1の労働者一人あたり私的純便益は次のようになる。

$$Y_1 - C_1 = Y^B = a \cdot N^\sigma (I + \bar{t} - \bar{t}') + \frac{2a \cdot N^\sigma (\bar{t}' - \bar{t})}{(2 + \sigma)} \quad (4C-1)$$

ある企業が固定的始業時刻制に変更したとする。このとき他のすべての企業

がフレックスタイム制を導入していて出発分布が分散しているので、この企業に勤める労働者も待ち行列なしで通勤でき、通勤費用はやはりゼロとなる。この企業の労働者は時刻  $\hat{t}$  に業務を開始し、 $\hat{t}+I$  に終了する。ここで、都市内において業務中の労働者の総数は式(4-23a)と(4-23b)に与えられている。したがって、この企業の一日当たり生産額は次のように計算できる。

$$\begin{aligned}
 Y_2 &= \int_{\hat{t}}^{\bar{t}} g(n(t))adt + (\bar{t} + I - \bar{t}')g(N)a + \int_{\bar{t}+I}^{\hat{t}+I} g(n(t))adt \\
 &= a \cdot N^\sigma (I + \bar{t} - \bar{t}') + \frac{2aN^\sigma (\bar{t}' - \bar{t}) (1 - 2^{-\sigma-1})}{(1+\sigma)} \quad (4C-2)
 \end{aligned}$$

なお、最後の式は  $\hat{t} = \frac{\bar{t}' + \bar{t}}{2}$  の仮定のもとで得られる。上の結果を  $(Y_1 - C_1) - (Y_2 - C_2)$

に代入することにより、(4-28)が得られる。

## 第II部 都市空間

## 第5章 単一中心都市におけるコードンプライシング\*

### 5-1 はじめに

交通混雑の程度は都市内の地点ごとに異なっている。多くの企業が立地している都心部では郊外部よりも交通量が多く、混雑が激しいことが通例である。このような状況のもとで混雑料金を実施する場合、どこでいくらの料金を徴収すべきであろうか。第II部では、様々な地点から発生したトリップによって引き起こされる交通混雑の空間的変動を考慮した混雑料金体系の設計問題に着目する。第1章で紹介した伝統的な混雑料金の理論は一点経済を想定していたので、上述のような問題を取り扱うためには、分析の枠組みを空間次元に拡張する必要がある。

都市空間における混雑の理論は、交通経済学よりも都市経済学において研究されてきた(たとえばKanemoto(1980), Sullivan(1983a), Fujita(1989))。そこでは最適な資源配分(ファーストベスト)を達成するため、都市内のすべての地点で各地点における混雑の外部効果に等しい混雑料金を徴収する必要があることが示されている。このように各地点で異なる料金を課するためには都市内のいたる所にカメラを設置し各車両を認識して料金額を計算するようなシステムを構築する必要がある。情報技術の進歩により、そのようなシステムは夢物語ではなくなりつつあるものの、実施のための費用を考慮すればまだ実用的な段階とはいえない。利用者側でも料金負担を考慮して合理的な選択をするためには複雑な計算を要するが、そのような機能を備えた情報システムをすべての車に装備することが、ファーストベストの料金体系を有効にするための前提となる。たとえ以上の条件が満たされたとしても、そのような料金体系の導入に対する社会的合意を得ることが最も困難である。したがって都市空間において実際に混雑料金を実施する場合、最適でなくても、より単純な次善(セカンドベスト)

---

\* 本章は Mun (2003)に基づいている。この論文の旧稿に対し、金本良嗣、松澤俊雄、佐々木公明、Robin Lindsey, Marvin Kraus、Erik Verhoef の諸氏から貴重なコメントをいただいた。



の料金システムを設計せざるを得ない。

都市空間を対象とした次善の混雑料金として現実に採用されている方式はコードンプライシング (Cordon pricing) である (シンガポール、ノルウェーの3都市、そしてロンドン)<sup>1</sup>。コードンプライシングとは、混雑の激しい都市中心部を取り囲むようにコードンラインを設け、そのコードンを通過する車両に対して一定の料金を課するものである。東京でも同様のコードンプライシングの導入に関する検討が進められていることが報道された (読売新聞2000年1月26日)。この方式は、上述のような都市空間モデルから導出されるような最善の料金ではないが、次善の政策としては現在のところ最も実施が容易である。しかし理論面では、コードンの位置をどこにすべきか、そしてその際の料金はどのように設定すべきかに関して経済学的分析は行われていない。したがって実際にいくつかの都市で設定されているコードンの位置と料金水準が経済学的に果たして望ましいものであるのかは明らかではない。このような次善の料金体系は、様々な地点における歪みを考慮しながら設計する必要があるので、その点ではファーストベストよりも複雑である。

上で紹介した都市経済学の研究では、立地点ごとに異なる厳密な最適混雑料金か、全く混雑料金を実施しないか、という両極端のケースしか考慮していない。最善ではないが実施可能な次善の料金政策に関する分析を、都市空間を考慮したモデルにもとづいて行った文献は少ない<sup>2</sup>。一方、次善の政策として、道路容量の調節に着目した研究はいくつか行われている (たとえば Kanemoto (1980))。これらの研究では、混雑料金がまったく実施できない状況を想定している。

---

<sup>1</sup> 正確には、ロンドンのシステムはコードンプライシングではなく、シンガポールで当初採用されていたエリアプライシングである。しかしいくつかの特例や割引措置により、実質的にはコードンプライシングとほぼ同様の方式といえる。

<sup>2</sup> Sullivan (1983b) および Kraus (1989) は例外である。Sullivan は、次善の政策として、立地点に関わらずすべての住民から単位距離あたり一定額の料金を徴収する政策 (ガソリン税と同じ) の効果を、土地利用モデルを用いて分析している。彼のモデルでも、これまでの研究と同様、土地利用構造に及ぼす効果に焦点をあてており、トリップ数そのものは料金導入によって変化しない。Kraus は、都市空間モデルにもとづいてコードンプライシングを取り扱った最初の研究である。一方、都市空間を考慮しないモデルで次善の料金政策を論じた研究は多く行われている (たとえば Verhoef ほか (1996) など)。

本章では、単一中心都市を対象として、最適なコードンの位置および料金水準を求める問題を検討する。そして最適なコードンプライシングが交通流と経済厚生に及ぼす効果を分析する。その際、従来の都市経済モデルとは対照的に、土地利用は与件とし、トリップ数を内生化したモデルを定式化する<sup>3</sup>。

## 5-2 モデル

### 5-2-1 トリップ需要と費用

都心を中心に広がる単一中心都市を想定する。都市内の各地点の属性は、都心からの距離  $x$  のみによって表わされる。各地点には密度 1 で個人が立地しており、各個人は何らかの目的で都心に自動車トリップを行うものと仮定する。トリップ需要は弾力的であり、各個人のトリップ回数はトリップ費用に依存する。トリップ費用が高くなれば、個人はトリップを断念するか、または公共交通機関のような代替輸送機関を用いる。いま  $x$  を CBD からの距離とし、地点  $x$  に立地する一個人あたりのトリップ数を  $q(x)$  とする。そしてトリップの逆需要関数を  $p(q(x))$  のように定義する。 $p(q(x))$  の値はトリップの私的限界便益を表す。

道路を単位距離あたり走行する費用はその地点での通過交通量  $Q(x)$  の増加関数であり、 $t(Q(x))$  で表すものとする。このような定式化は、すべての地点において道路容量が一定であることを意味する。このとき地点  $x$  からのトリップに要する費用  $C(x)$  は、次のように定義される。

$$C(x) = \int_0^x t(Q(y)) dy. \quad (5-1)$$

すべてのトリップは都心に向かい、人口密度は 1 であるから、 $x$  における通過

---

<sup>3</sup>都市経済学における問題意識は、交通混雑の問題を解決するために交通需要の発生源である土地利用の空間的構造を改変すべきというものであった。そのため混雑の外部性が人々の立地選択を歪ませる問題を主として議論しており、それらのモデルにおいて自動車交通需要は非弾力的である。すなわち混雑料金を導入してもトリップ数に変化はないと想定されているので、短期的には混雑対策の効果がまったく期待できない。現実には、トリップの費用が高くなれば、頻度を減らしたり他の手段を用いるなどするので、短期的にも交通量は変化することが予想される。この点で従来の都市経済モデルは非現実的である。

交通量  $Q(x)$  は、

$$Q(x) = \int_x^B q(y) dy, \quad (5-2)$$

と定義できる。ここに  $B$  は都心から都市の外側境界までの距離である。

### 5-2-2 無料金均衡

各個人は、私的限界便益が私的費用を上回る限りトリップを行う。したがって均衡では、式(5-1),(5-2)とともに、すべての地点で次の条件が成り立つ。

$$p(q(x)) = C(x) \quad \text{for all } x, \quad 0 \leq x \leq B, \quad (5-3)$$

ここでは需要関数と走行費用関数を、それぞれ以下のように特定化する。

$$p(q(x)) = a - bq(x), \quad (5-4)$$

$$t(Q(y)) = f + cQ(y), \quad (5-5)$$

ここに  $a$ 、 $b$ 、 $f$ 、 $c$  は正の定数である。 $f$  は交通量がゼロであるとき単位距離を走行する費用 (=自由走行費用)、 $c$  は通過交通量がトリップ費用に及ぼす限界的効果を表している。

式(5-4)と(5-5)を(5-3)に適用し、その両辺を  $x$  について微分することにより、次が得られる。

$$-bq'(x) - t(Q(x)) = 0 \quad (5-6)$$

ここに  $q'(x)$  は  $q(x)$  の一次導関数である。次に式(5-2)の両辺を  $x$  について微分すると次が得られる。

$$Q'(x) = -q(x) \quad (5-7)$$

さらに式(5-6)をもう一度  $x$  で微分し、式(5-5)と(5-7)を考慮すると、

$$-bq''(x) + cq(x) = 0, \quad (5-8)$$

ここに  $q''(x)$  は  $q(x)$  の二次導関数である。式(5-6)より  $q'(x) < 0$ 、式(5-8)より  $q''(x) > 0$  であることがわかる<sup>4</sup>。すなわち、均衡において各地点から発生するトリップ数は、都心からの距離とともに減少するが、その減少率は逓減する。

各地点における均衡トリップ数を  $q^*(x)$  と表そう。これは式(5-8)の微分方程式

---

<sup>4</sup> 後に示されるように、社会的最適およびコードンプライシングのもとでの均衡においても、各地点の発生トリップ数に関する微分方程式は式(5-8)と同じ構造を有する。したがって、これらのケースにおいても  $q'(x) < 0$ 、 $q''(x) > 0$  が成り立つ。

の解であり、次のように求められる。

$$q^*(x) = \lambda_1 \exp(\alpha x) + \lambda_2 \exp(-\alpha x), \quad (5-9)$$

ここに  $\alpha = \sqrt{c/b}$  であり、 $\lambda_1, \lambda_2$  は境界条件により定まる定数である。

境界条件は二つ必要である。一つは、式(5-3)に  $x=0$  を適用し、 $C(0)=0$  を考慮することにより、 $q^*(x) = a/b$  のように与えられる。もう一つは、式(5-6)に  $x=0$  を適用することにより与えられ、それは  $-bq^{*'}(0) = f + cQ(0)$  である。これら二つの条件式を用いて、 $\lambda_1, \lambda_2$  が次のように求められる。

$$\lambda_1 = \frac{a \exp(-\alpha B) - f/\alpha}{b(\exp(\alpha B) + \exp(-\alpha B))},$$

$$\lambda_2 = \frac{a \exp(\alpha B) + f/\alpha}{b(\exp(\alpha B) + \exp(-\alpha B))}.$$

### 5-2-3 社会的最適

社会的最適とは、都市内の総社会的余剰を最大化するような地点別トリップ・パターンとして定義される。目的関数は次の通り。

$$V = \int_0^B \left[ \int_0^{q(x)} p(q) dq - C(x)q(x) \right] dx. \quad (5-10)$$

最適条件より、次が得られる。

$$p(q(x)) = C(x) + \int_0^x t'(Q(y))Q(y)dy, \quad (5-11)$$

上式の右辺第2項は混雑外部性を表している。これは、 $x$  からの追加的な1トリップが、 $x$  から0に至るすべての区間で同区間を利用する全車両の速度をわずかつ低下（所要時間を増加）させることによる損失の合計である。式(5-11)は、地点  $x$  からの追加的なトリップによる社会的限界便益と社会的限界費用を等しくすべきという、社会的効率性の条件である。このような社会的に効率的な道路利用を分権的に達成するためには、各トリップに対し、混雑外部性に等しい料金を徴収する必要がある。このような料金システムのもとでは、地点ご

と異なる料金が課されることになるが、これを現実に実行することは困難である。本研究では社会的最適を達成する料金システムを代替的政策として考慮するのではなく、次善の政策であるコードンプライシングの相対的効果を評価するための参照点として位置づける。

式(5-11)に対して、式(5-4)と(5-5)の特定化を適用すると次が得られる。

$$a - bq(x) = fx + 2c \int_0^x Q(y) dy. \quad (5-12)$$

無料金均衡の場合と同様にして、上の式の両辺を  $x$  について二回微分すると、

$$-bq''(x) + 2cq(x) = 0 \quad (5-13)$$

が得られ、同様の手続きにしたがって上式を解くことにより、社会的に効率的な地点別トリップ数  $q^o(x)$  が次のように求められる。

$$q^o(x) = \eta_1 \exp(\gamma x) + \eta_2 \exp(-\gamma x), \quad (5-14)$$

ここに  $\gamma = \sqrt{2c/b}$ 、 $\eta_1 = \frac{a \exp(-\gamma B) - f/\gamma}{b(\exp(\gamma B) + \exp(-\gamma B))}$ 、 $\eta_2 = \frac{a \exp(\gamma B) + f/\gamma}{b(\exp(\gamma B) + \exp(-\gamma B))}$  である。

### 5-3 コードンプライシングのもとでの均衡トリップ

図 5-1 に示すように、都心から  $x_m$  の地点にコードンが設定され、コードンを通過する車両に対して  $\tau$  に等しい料金が課されるものと想定する。コードンの外側 ( $x > x_m$ ) に立地する者にとって、トリップ費用は時間費用に料金を加えたものであるのに対し、内側に立地する個人はコードンを通過しないので時間費用のみを負う。



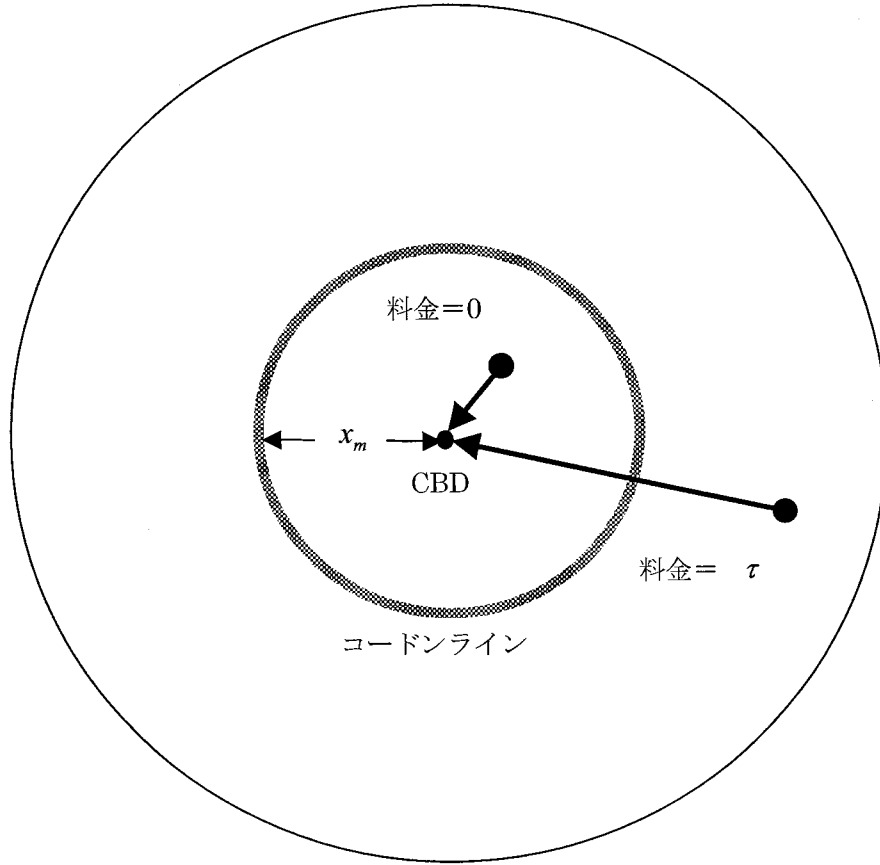


図 5-1 コードンプライシング

コードンプライシングのもとで均衡が達成されたとき、コードンの内側および外側地域から発生するトリップ数を、それぞれ  $q_i^{**}(x)$  および  $q_o^{**}(x)$  と表すことにしよう。このとき均衡においては次の式が成り立つ。

$$\begin{cases} p(q_i^{**}(x)) = C(x) \\ C(x) = \int_0^x t(Q_i(y)) dy \\ Q_i(y) = \int_y^{x_m} q_i^{**}(z) dz + \int_{x_m}^B q_o^{**}(z) dz \end{cases} \quad \text{for } 0 \leq x \leq x_m \quad (5-15)$$

$$\begin{cases} p(q_o^{**}(x)) = C(x) + \tau \\ C(x) = \int_0^x t(Q_i(y))dy + \int_{x_m}^x t(Q_o(y))dy \\ Q_i(y) = \int_{x_m}^B q_o^{**}(z)dz \end{cases} \quad \text{for } x_m \leq x \leq B \quad (5-16)$$

$$Q_i(x_m) = Q_o(x_m). \quad (5-17)$$

式(5-15)と(5-16)は、それぞれ  $x_m$  の内側と外側にある各地点で成り立つ均衡条件である。式(5-17)は、状態変数である二つの通過交通量関数  $Q_i(x)$  と  $Q_o(x)$  が  $x_m$  において連続になることを表わしている。

前節と同様、 $t(Q(y)) = f + cQ(y)$  および  $p(q(x)) = a - bq(x)$  と特定化して、微分方程式を解く。このとき、コードンプライシングのもとでの各地点で発生するトリップ数が次のように得られる。

$$q_i^{**}(x) = \mu_1 e^{\alpha x} + \mu_2 e^{-\alpha x}, \quad \text{for } 0 \leq x \leq x_m, \quad (5-18a)$$

$$q_o^{**}(x) = \mu_3 e^{\alpha x} + \mu_4 e^{-\alpha x}, \quad \text{for } x_m \leq x \leq B, \quad (5-18b)$$

ここに  $\alpha$  は前節で定義したものと同様である。また  $\mu_1, \mu_2, \mu_3, \mu_4$  は未定係数であるが、これらを求めるため4つの境界条件が以下のように与えられる。

まず、 $x=0$  において下の式が成り立つ。

$$p(q_i^{**}(0)) = C(0) = 0, \quad (5-19a)$$

$$p' \frac{dq_i^{**}(0)}{dx} - t(Q_i(0)) = 0. \quad (5-19b)$$

次に  $x=x_m$  において、式(5-15)、(5-16)に式(5-17)を代入することにより

$$p(q_i^{**}(x_m)) = p(q_o^{**}(x_m)) - \tau. \quad (5-19c)$$

さらに、都市境界  $B$  においては次が成り立つ。

$$p' \frac{dq_o^{**}(B)}{dx} - t(Q_o(B)) = 0. \quad (5-19d)$$

以上4本の境界条件式を用いて、未定係数が次のように求められる。

$$\mu_1 = \frac{-2 \frac{f}{\alpha} + 2\alpha e^{-\alpha B} + \tau(e^{\alpha(B-x_m)} - e^{-\alpha(B-x_m)})}{2b(e^{\alpha B} + e^{-\alpha B})}, \quad (5-20a)$$



$$\mu_2 = \frac{2\frac{f}{\alpha} + 2\alpha e^{-\alpha B} - \tau(e^{\alpha(B-x_m)} - e^{-\alpha(B-x_m)})}{2b(e^{\alpha B} + e^{-\alpha B})}, \quad (5-20b)$$

$$\mu_3 = \frac{-2\frac{f}{\alpha} + 2\alpha e^{-\alpha B} - \tau(e^{\alpha(B-x_m)} + e^{-\alpha(B-x_m)})}{2b(e^{\alpha B} + e^{-\alpha B})}, \quad (5-20c)$$

$$\mu_4 = \frac{2\frac{f}{\alpha} + 2\alpha e^{-\alpha B} - \tau(e^{\alpha(B-x_m)} + e^{-\alpha(B-x_m)})}{2b(e^{\alpha B} + e^{-\alpha B})}. \quad (5-20d)$$

コードンの位置と料金水準の外生的変化が、地点別トリップ数に及ぼす影響は以下の通りである。

$$\frac{\partial q_i^{**}(x)}{\partial x_m} = \frac{-\tau(\alpha e^{\alpha(B-x_m)} + \alpha e^{-\alpha(B-x_m)})(e^{\alpha x} - e^{-\alpha x})}{2b(e^{\alpha B} + e^{-\alpha B})} < 0, \quad \text{for } 0 \leq x \leq x_m, \quad (5-21a)$$

$$\frac{\partial q_o^{**}(x)}{\partial x_m} = \frac{-\tau \alpha e^{-\alpha(x+x_m)}(-e^{2\alpha B} + e^{2\alpha(B+x_m)} - e^{2\alpha x} + e^{2\alpha(x+x_m)})}{2b(1+e^{2\alpha B})} < 0, \quad \text{for } x_m \leq x \leq B, \quad (5-21b)$$

$$\frac{\partial q_i^{**}(x)}{\partial \tau} = \frac{(e^{\alpha x} + e^{-\alpha x})(e^{\alpha(B-x_m)} - e^{-\alpha(B-x_m)})}{2b(e^{-\alpha B} + e^{\alpha B})} > 0, \quad \text{for } 0 \leq x \leq x_m, \quad (5-22a)$$

$$\frac{\partial q_o^{**}(x)}{\partial \tau} = \frac{e^{-\alpha(x+x_m)}(e^{2\alpha B} + e^{2\alpha x})(1+e^{2\alpha x_m})}{2b(1+e^{2\alpha B})} < 0, \quad \text{for } x_m \leq x \leq B. \quad (5-22b)$$

(5-21a)と(5-21b)によると、コードンの位置が外側に移動することにより、均衡トリップ数はすべての地点で減少する<sup>5</sup>。また(5-22a)と(5-22b)によれば、料金が上昇することにより、コードンの内側の地点ではトリップ数が増加し、外側では減少する。これは内側（外側）では無料金均衡のときよりもコードンプライシングのもとでの均衡トリップ数がより多い(少ない)ことを意味する。図 5-2

<sup>5</sup> 厳密にはすべての地点で減少するわけではなく、コードンの外側直近地点  $x_m$  では均衡トリップ数が増加することになる。その地点はコードンが外側に動くことによって、コードンの外側にあったのに内側領域に編入されることになるので、 $q_o(x_m)$  から  $q_i(x_m)$  へと変化する。なお式(5-23)に示されるように  $q_o(x_m) < q_i(x_m)$  である。

にはこのことが示されている。コードンの外側の地点では料金負担の増加により交通需要が減少するが、その結果、内側での通過交通量（混雑水準）を減少させる。一方、コードンの内側では料金を払わずに通過交通量減少による混雑緩和がもたらされるので交通需要が増加する。すなわちコードンプライシング導入によって都心側利用者の消費者余剰は増加し、郊外側では減少する。

(5-21a)は、コードンの位置が外側に移動すると、すべての地点で交通需要が減少するにもかかわらず、都心側の地点での交通混雑が激しくなることを意味する。このことを見るために、コードンが  $x_m$  から  $x_m + dx_m$  へとわずかに外側へ移動したとき、地点  $x$  ( $0 \leq x \leq x_m$ ) における交通量の変化を調べる。

$$\frac{\partial Q_i(x)}{\partial x_m} = \int_x^{x_m} \frac{\partial q_i^{**}(y)}{\partial x_m} dy + \int_{x_m}^B \frac{\partial q_o^{**}(y)}{\partial x_m} dy + q_i^{**}(x_m) - q_o^{**}(x_m) \quad (5-23)$$

上式の右辺第1項、第2項は、式(5-21)より負であるが、第3項は第4項よりも大きい。すなわちコードンが外側へ移動することにより、 $x_m$  から  $x_m + dx_m$  の間に立地する個人は料金を払わなくてすむようになるので、トリップ数を  $q_o^{**}(x_m)$  から  $q_i^{**}(x_m)$  へと増やす。この増加分がすべての地点でのトリップ数減少の総和を上回るほど大きいのである<sup>6</sup>。以上より、コードンが外側に移動するとそれによって課金を免れるようになる地点の利用者のみが消費者余剰を増加させ、それ以外のすべての利用者の余剰は減少する。

<sup>6</sup> これは、下に示すように、式(5-23)の右辺を展開することにより確かめられる。

$$\frac{\partial Q_i(x)}{\partial x_m} = \frac{\alpha(-e^{\alpha(2B-x-x_m)} + e^{\alpha(2B+x-x_m)} - e^{-\alpha(x-x_m)} + e^{\alpha(x+x_m)})}{2(1+e^{2\alpha B})} > 0$$

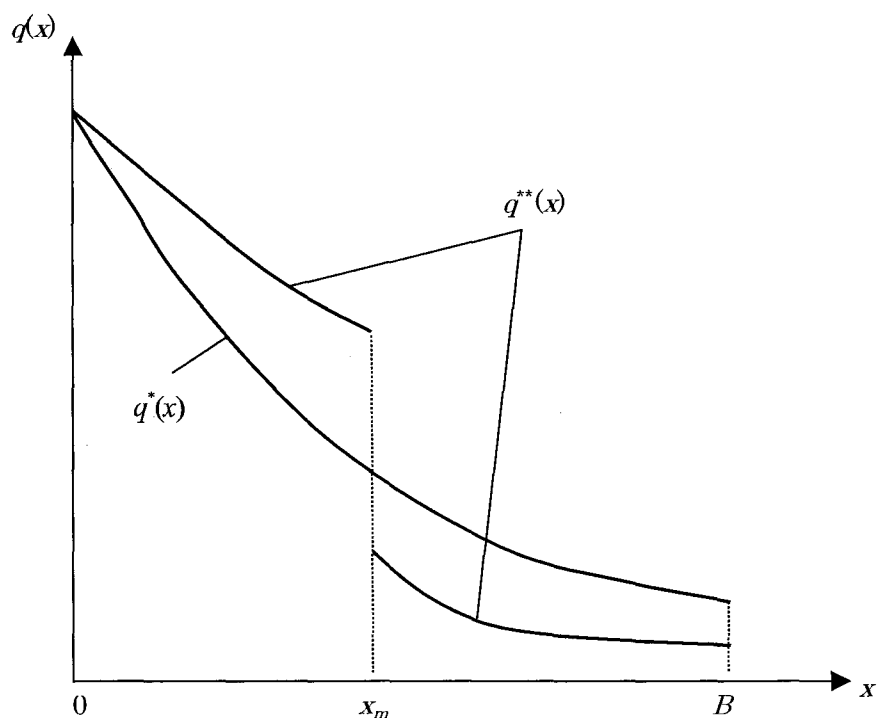


図 5-2 無料金均衡とコードンプライシング均衡

#### 5-4 最適なコードンプライシング

最適なコードンプライシングとは、次のように定義される社会的余剰を最大化するよう、コードンの位置  $x_m$  と料金水準  $\tau$  を設定する政策である。

$$V = \int_0^{x_m} \left[ \int_0^{q(x)} p(q) dq - C(x)q(x) \right] dx + \int_{x_m}^B \left[ \int_0^{q(x)} P(q) dq - C(x)q(x) \right] dx.$$

この問題には、コードンプライシングのもとでの均衡条件である式(5-15)から(5-17)が制約条件として与えられる。しかし均衡における地点別トリップ数は、前節で  $q_i^{**}(x)$ 、 $q_o^{**}(x)$  として明示的に解かれている<sup>7</sup>。したがって、式(5-18)および(5-19)を目的関数に代入すれば、制約付き最適化問題として取り扱う必要はない。

<sup>7</sup> その意味では、 $q_i^{**}(x)$  と  $q_o^{**}(x)$  を、それぞれ  $q_i^{**}(x, \tau, x_m)$  と  $q_o^{**}(x, \tau, x_m)$  のように表記すべきであるが、ここでは省略する。

$x_m$  と  $\tau$  に関する最適化の一階の条件は、それぞれ次の通りである。

$$\begin{aligned} & \int_0^{q_i^{**}(x_m)} p(q) dq - C(x_m) q_i^{**}(x_m) - \left[ \int_0^{q_o^{**}(x_m)} p(q) dq - C(x_m) q_o^{**}(x_m) \right] \\ & + \int_0^{x_m} \left[ p(q_i^{**}(x_m)) - C(x) - E(x) \right] \frac{\partial q_i^{**}(x)}{\partial x_m} dx + \int_{x_m}^B \left[ p(q_o^{**}(x)) - C(x) - E(x) \right] \frac{\partial q_o^{**}(x)}{\partial x_m} dx = 0, \end{aligned} \quad (5-24a)$$

$$\int_0^{x_m} \left[ p(q_i^{**}(x)) - C(x) - E(x) \right] \frac{\partial q_i^{**}(x)}{\partial \tau} dx + \int_{x_m}^B \left[ p(q_o^{**}(x)) - C(x) - E(x) \right] \frac{\partial q_o^{**}(x)}{\partial \tau} dx = 0, \quad (5-24b)$$

ここに、

$$E(x) = \begin{cases} \int_0^x t'(\mathcal{Q}_i(y)) \mathcal{Q}_i(y) dy, & \text{for } 0 \leq x \leq x_m, \\ \int_0^{x_m} t'(\mathcal{Q}_i(y)) \mathcal{Q}_i(y) dy + \int_{x_m}^x t'(\mathcal{Q}_o(y)) \mathcal{Q}_o(y) dy, & \text{for } x_m < x \leq B. \end{cases} \quad (5-25)$$

$E(x)$  は、地点  $x$  における一台のトリップ数増加がもたらす混雑の外部性、すなわち  $x$  から 0 に至るすべての区間で、同区間を利用する全車両の速度をわずかなずつ低下（所要時間増加）させることによる損失の合計に等しい。

式(5-24a)の左辺第 1 項と第 2 項は、コードンの位置  $x_m$  がわずかに移動したことによる社会的余剰の直接的変化を表す。すなわち料金の支払いを免れるようになった者の消費者余剰の増加分から料金収入の減少分を引いたものであり、これら二項の差は正となる<sup>8</sup>。式(5-24a)の第 3 項および第 4 項は、コードンが外側へ移動したことによるトリップ数の変化が社会的余剰に与える間接的影響を空間について集計（積分）したものである。これらの間接効果は次善の状態における死重損失の変化である。第 3 項はコードンの内側における変化を示し、

<sup>8</sup> コードンの位置が外側へ移動することにより、 $x_m$  に立地する個人の私的費用は  $C(x_m) + \tau$  から  $C(x_m)$  へと減少する。式(5-24a)の第 1 項と第 2 項は次のように書き換えられる。

$$\left[ \int_0^{q_i^{**}(x_m)} p(q) dq - C(x_m) q_i^{**}(x_m) \right] - \left[ \int_0^{q_o^{**}(x_m)} p(q) dq - \{C(x_m) + \tau\} q_o^{**}(x_m) \right] - \tau q_o^{**}(x_m).$$

最初の二項における [] は、それぞれ、コードンのすぐ内側と外側に立地する者の消費者余剰を表す。したがって、 $x_m$  に立地する個人の消費者余剰は増加する。第 3 項は、コードンのすぐ外側にいる者が払う料金であり、これはコードンが移動したことにより失われる収入である。

式(5-15)、(5-21a)より正である<sup>9</sup>。これはコードンの移動により、その内側領域で死重損失が減少することを意味する。以上の議論から、式(5-24a)が成立するには、第4項が負にならねばならないが、式(5-21b)より  $\frac{\partial q_o^{**}(x)}{\partial x_m} < 0$  であることを考慮すると、第4項における積分内の[]は、 $x_m$ から $B$ の間の少なくとも一部の区間で正の値を持たねばならない。

一方、式(5-24b)の左辺第1項は、式(5-22a)、(5-15)より負である（すなわち料金を上げると、コードンの内側で死重損失が増える）。この式が成り立つためには第2項が正となる必要がある。ここで式(5-22b)より  $\frac{\partial q_o^{**}(x)}{\partial \tau} < 0$  であるから、積分内の[]は、 $x_m$ から $B$ の間の少なくとも一部の区間で負の値を持たねばならない。

二つの式に関する以上の考察を総合すると、コードンの外側の区間すなわち  $x_m$ と $B$ の間では、 $p(q_o^{**}(x)) - C(x) - E(x)$ が正の値を持つ区間と負の値を持つ区間が存在する。式(5.16)から  $p(q_o^{**}(x)) - C(x) - E(x) = \tau - E(x)$ と表されること、および  $E(x)$ は $x$ について単調に増加することを考慮すれば、 $\tau$ と $E(x)$ は図5-3のような位置関係になるはずである。すなわち、ある地点 $\tilde{x}$ が存在し、 $\tau - E(x)$ の値は $x_m$ と $\tilde{x}$ の間では正、 $\tilde{x}$ の外側では負となる。

---

<sup>9</sup> 式(5-15)より、 $p(q_i^{**}(x)) - C(x) = 0$ であるから、式(5-24a)、右辺第3項の積分内の[]は  $-E(x)$ となり、負である。また、式(5-21a)より、 $\frac{\partial q_i^{**}(x)}{\partial x_m} < 0$ である。したがって、第3項は正の値を持つ。

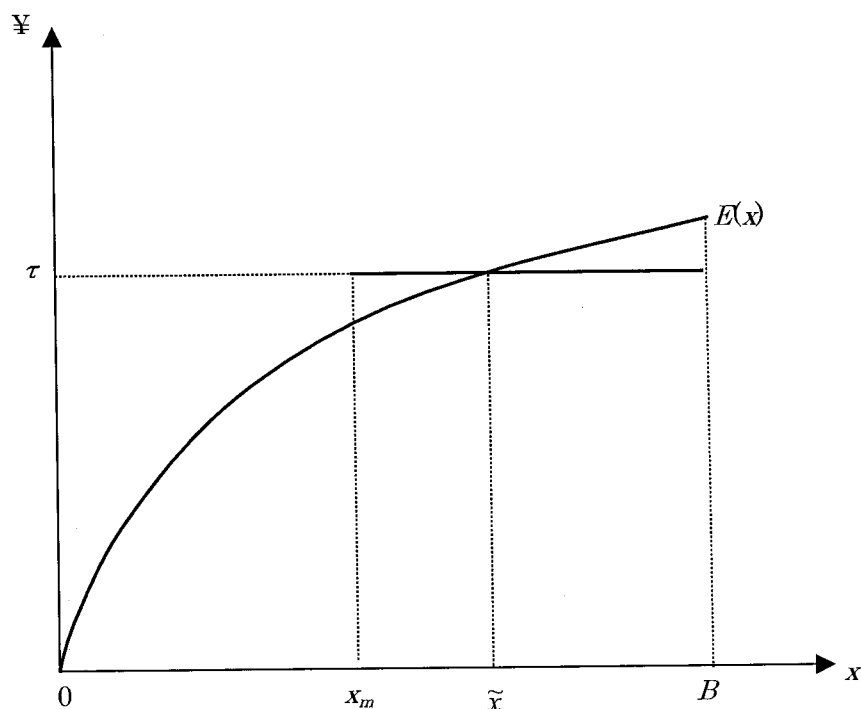


図 5-3 地点ごとの外部費用と最適料金との関係

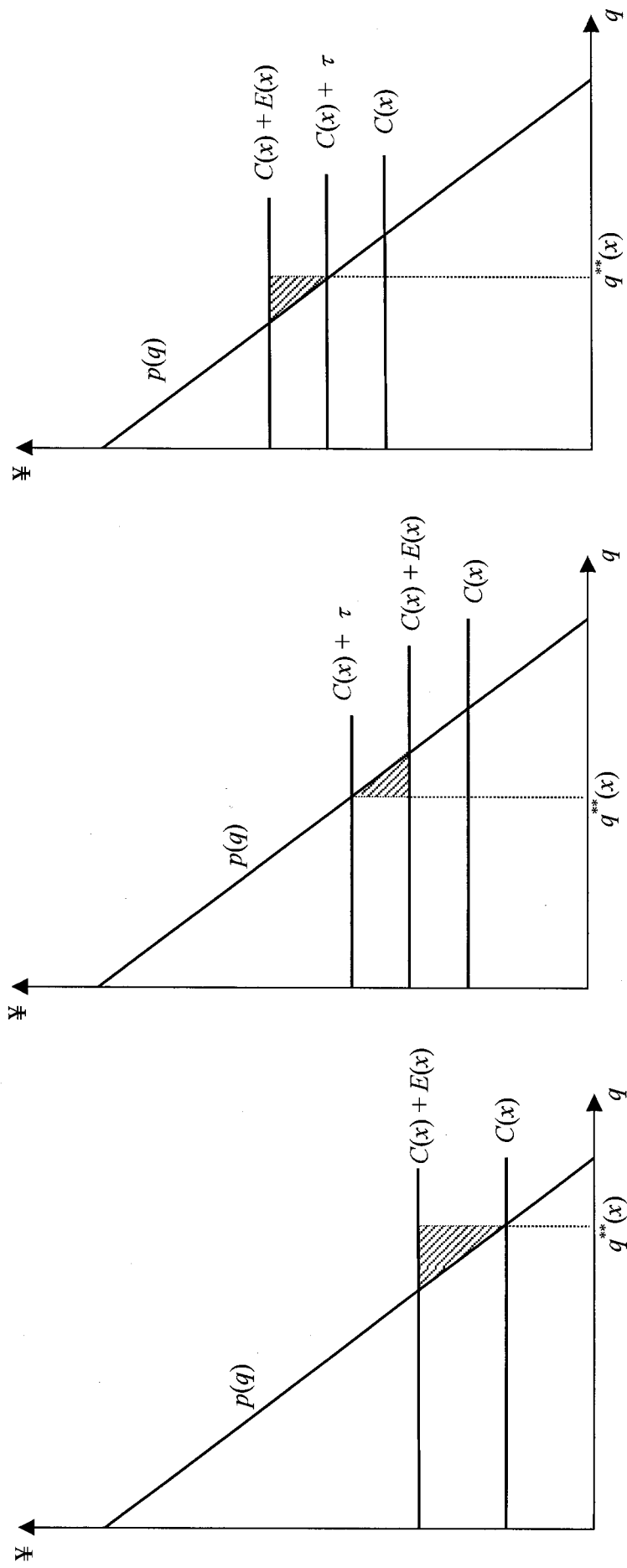
図 5-4 は、代表的な三つの地点について、コードンプライシングのもとでの資源配分の状況を示している。ここで  $C(x)+E(x)$  は、地点  $x$  から発生するトリップ数の限界的増加による社会的費用の増加分であるから、社会的限界費用と解釈できる。コードンの内側 ( $x < x_m$ ) では、社会的限界費用が限界便益を上回っているのでトリップ数が過大である。同様に、 $x_m < x < \tilde{x}$  では過小であり、 $\tilde{x} < x < B$  では過大である。これらの歪みに起因する死重損失は図において斜線で示された領域の面積に等しい。死重損失の値は、コードンの位置と料金水準を変化させることにより、一部の地点では増加し、他の地点では減少する。

表 5-1 は、コードンの位置および料金が最適水準から変化したときの死重損失の変化の方向をまとめたものである。表において、符号 + (−) は対応する変数の値 ( $x_m$  または  $\tau$ ) が最適値からわずかに増加したときに、死重損失が増加 (減少) することを意味する。たとえば  $x_m$  を増加させる (コードンの位置を外側に移動させる) と、 $0 \leq x < x_m$  の各地点において死重損失は減少する。最適なコードンプライシングでは、死重損失を増加させる効果と減少させる効果

が相殺するようにコードンの位置と料金を設定するのである。

表 5-1 コードンプライシングによる死重損失の変化

	立 地		
	$0 \leq x < x_m$	$x_m < x < \tilde{x}$	$\tilde{x} < x \leq B$
$x_m$	—	+	—
$\tau$	+	+	—



(a)  $0 \leq x \leq x_m$

(b)  $x_m \leq x \leq \tilde{x}$

(c)  $\tilde{x} \leq x \leq B$

図 5-4 区間別のトリップ費用、料金、外部費用の関係



## 5-5 経済厚生の評価

ここでは数値シミュレーションにより、最適なコードンプライシング・無料金均衡・社会的最適のもとで、それぞれ達成する社会的余剰の水準を比較することによって、コードンプライシングの導入が経済厚生面でどのような効果を持つかを調べる。社会的余剰の大きさは、(最適) > (コードンプライシング) > (無料金均衡) であることが明らかなので、まったくの仮想的パラメータによる計算によって、特に新しい知見が得られるわけではない。そこで現実のデータを用いて、正確でないとしても大きくかけ離れない程度のパラメータ値を求め、それに基づいて大まかな定量的評価を試みる。

大阪府のデータを用いてモデルのパラメータ値を次のように設定した（設定方法については付論を参照）。

$$B = 50, \quad a = 130, \quad b = 498, \quad c = 0.52, \quad f = 1.2.$$

表 5-2 には、上のパラメータ値（基本ケース）を与えた場合の計算結果を示している。最適なコードンの位置は都心から 7.54km、時間で測った料金は 29.42 分であった。時間評価値を 2000 円／時とすると、料金の額は 980.7 円となる。また、表には三通りのシステムのもとの社会的余剰が時間の単位で示されている<sup>10</sup>。表において社会的余剰の右側に記された()内の数値は、社会的最適のもとの社会的余剰の水準に対する比率を示している。これより、コードンプライシングのもとの社会的余剰は、無料金均衡の場合より 12% 大きくなるが、社会的最適よりも 0.7% 小さいだけである。コードンプライシングは単純なシステムであるにもかかわらず、料金徴収に多大な労力を要する社会的最適解と比べてもほとんど遜色ない効果を達成している。

---

<sup>10</sup> パラメータ値はモデルの仮定に基づいて設定されている（例えば、単一中心であることや人口密度が 1 であるといったものである）。したがってここで計算された社会的余剰の値は、代替的な料金システムの比較においてのみ意味がある。

表5-2 計算結果の詳細

	基本ケース	需要がより弾力的	道路容量が大きい
需要関数のパラメータ $b$	498	748	498
費用関数のパラメータ $c$	0.52	0.52	0.26
最適なコードン立地点	7.54 km	8.32 km	8.78 km
最適なコードン料金	29.42 min	25.63 min	22.65 min
社会的余剰			
無料金均衡	233.5 分 (0.887)	184.6 分 (0.918)	309.0 分 (0.939)
社会的最適	263.4 分 (1.000)	201.0 分 (1.000)	329.2 分 (1.000)
コードンプライシング	261.6 分 (0.993)	200.0 分 (0.995)	327.9 分 (0.996)

上の結果は、ここで用いた特定のパラメータ値に依存するのであろうか。このことを確認するため、異なったパラメータ値に対してシミュレーションを行った。表 5-2 には、需要関数および費用関数パラメータに異なる値を与えた場合の結果が示されている。ここで、 $b$  が大きいということはトリップ需要の弾力性が小さいことを意味する。また  $c$  の値が小さいということは、混雑の水準が交通量の増加に対してあまり感応的でない、すなわち道路容量が全区間において大きい状況であると解釈できる。表によると、トリップ需要の弾力性が小さい場合、コードンの位置は都心からより遠くなり、料金水準は低くなる。 $c$  の値が小さい場合には、コードンの位置が遠くなり、料金水準も低くなる。図 5-5 と 5-6 は、様々な  $b$ 、 $c$  の値に対して、それぞれ無料金均衡、最適なコードンプライシングおよび社会的最適に対する社会的余剰を計算してプロットしたものである。

社会的余剰

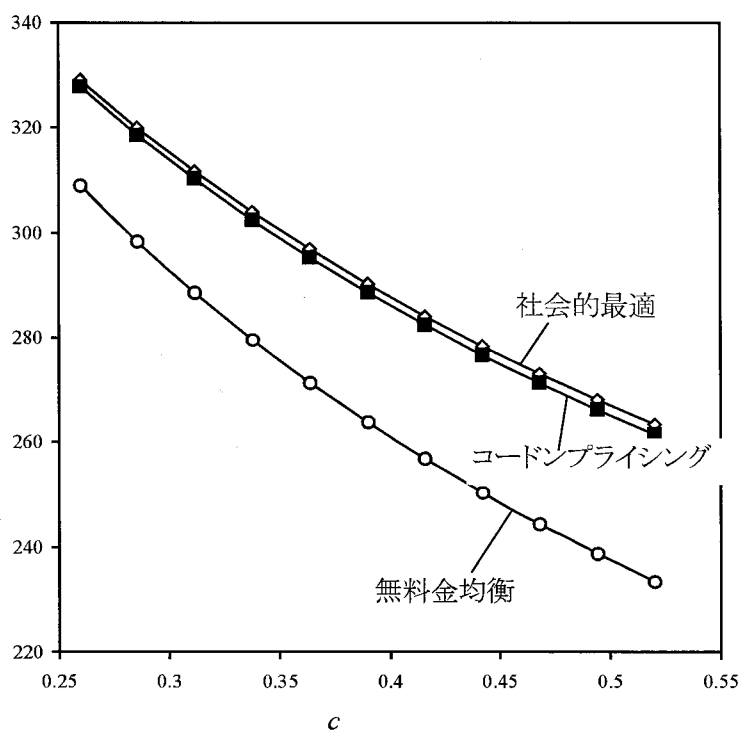


図5-5 費用関数のパラメータ $c$ と社会的余剰

社会的余剰

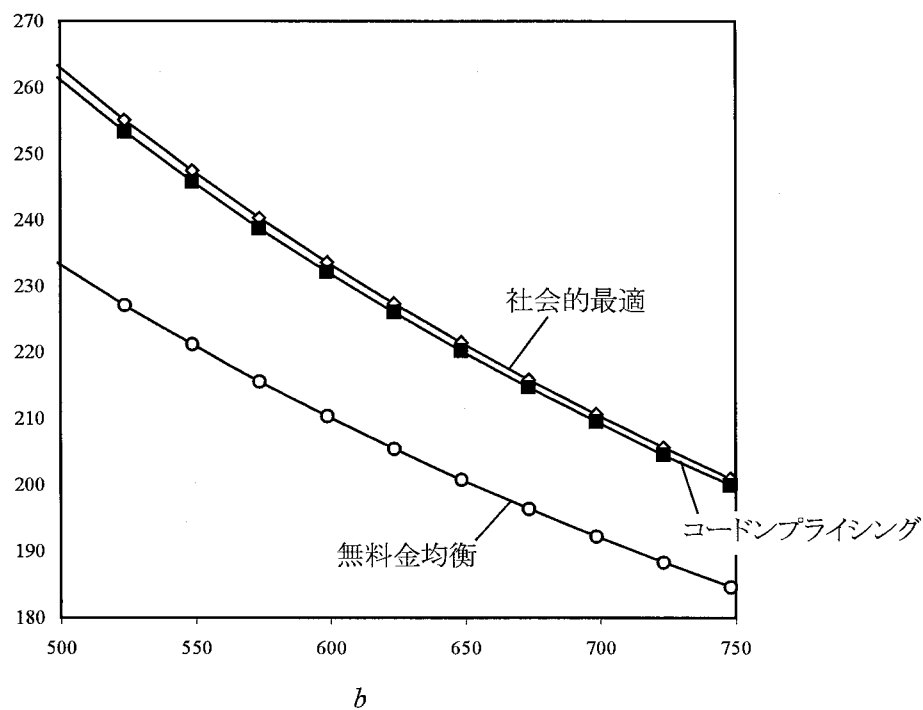


図5-6 需要関数のパラメータ $b$ と社会的余剰

図を見ると、パラメータの値にかかわらず、最適なコードンプライシングのもとでの社会的余剰の値が社会的最適にかなり近い水準になっている。これは、広い範囲のパラメータ値に対して、コードンプライシングが社会的最適とほぼ同等の経済厚生水準を達成できることを示している。

では、なぜコードンプライシングが上に示したような良い結果をもたらすのであろうか。コードンプライシングがいかにして混雑外部性を制御するのかについてより詳しく調べてみよう。式(5-25)が示すように、混雑の外部性は各地点における通過交通量、すなわちその地点よりも外側から発生したトリップの総数に依存する。図 5-7 は、それぞれ無料金均衡、社会的最適およびコードンプライシングに対する交通量  $Q(x)$  をプロットしたものである。定義（式(5-2)）より、すべてのケースで都市境界  $B$  での交通量は 0 であり、それぞれの曲線の勾配の絶対値は各地点で発生するトリップ数  $q(x)$  に等しい。

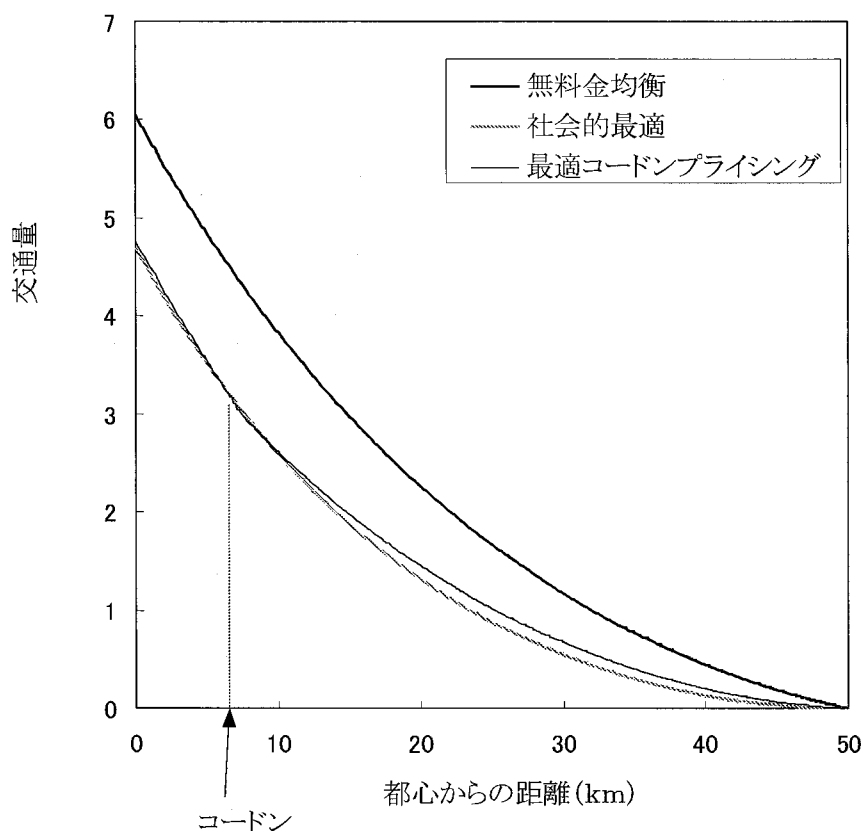


図5-7 料金制と通過交通量の空間分布

図より、コードンプライシングおよび社会的最適の交通量曲線がほぼ重なっており、二つの曲線が中間地点で二度交差していることが見て取れる。図 5-3 に示したように、最適なコードンプライシングのもとではコードンの内側でトリップ数が過大、すぐ外側では過小、都市の外縁部では再び過大となっていた。このことは、図中の二つの曲線の相対的な傾きに反映されている。すなわち、コードンの内側ではコードンプライシングの交通量曲線がより急な傾きとなり、すぐ外側でより緩やかになり、再び外縁部でより急な傾きになっている。コードンプライシングは一ヶ所でのみ料金を徴収するというきわめて単純なシステムであるが、都市空間を三つの領域に分け、各領域内から発生するトリップ数（交通量曲線の傾き）を調節することにより、最善のケースにおける交通量からの乖離を最小化するのである。

## 5-6 おわりに

本章では単一中心都市における交通混雑のモデルを用いて、コードンプライシングが各地点におけるトリップ発生および混雑水準に与える影響を調べた。最適なコードンプライシングは、都市内の社会的余剰を最大化するようなコードンの位置（CBD からコードンまでの距離）とそこで課される料金額の組合せである。最適なコードンプライシングのもとでは、コードン内と都市の外縁部で発生するトリップ数は過大となるが、コードンのすぐ外側では過小となる。日本のデータに基づいたパラメータによる数値シミュレーションでは、コードンプライシングが社会的最適の場合とほぼ同等の経済的厚生水準を達成する。

本研究では、分析の簡単化のため、様々な仮定を導入している。中でも最も制約的なものが、単一中心都市の仮定である。この仮定のもとでは、すべてのトリップが CBD に向かうことになる。この仮定は次の章で緩められるが、コードンプライシングが極めて有効であるという結果は修正される。また、長期的な影響を知るためには土地利用の変化も考慮に入れる必要があろう。コードンの内側から発生するトリップは料金が課されないため、コードンプライシングのもとでは、中心部の立地がより魅力的になる。この結果、都市の土地利用構

造は中心部が高密度化する方向に変化するが、これは土地利用の効率性を改善すると考えられる。混雑を考慮した単一中心都市モデルの研究（例えば Fujita(1989)や Kanemoto(1980)）では、都市圏域がコンパクトになると効率性が改善されることが示されている。しかし、単一中心の仮定を緩めると、さまざまな土地利用パターンが想定可能である。企業や個人はコードンの外側に移動すれば、コードンを通過しないようなトリップを選択することにより料金支払を避けることができる。すなわちコードンプライシングの導入により、単一中心都市のもとで予想される集中化と異なり、都市の空間構造の分散化をもたらす可能性がある。この問題は将来的に検討するに値するものである。Anas and Xu (1999)は、次善の価格政策を考慮していないものの、この問題の分析に有効な枠組みを提供している。また、本研究ではコードンプライシングの設定に要する費用を無視していた<sup>11</sup>。当然のこととして、そのような費用は、コードンが都市の外側に移動すると、コードンを通過する道路の本数が増加するので増加する。したがって、最適なコードンの位置は、本研究で得られたものより中心に近くなるだろう。他にも、将来的に研究されるべき重要な問題として、道路容量に対する投資の問題がある。Kanemoto (1980)が無料金のもとでの次善の政策として投資政策を分析したが、次善の料金と容量への投資を組み合わせた場合の分析も望まれる。

#### 付論： シミュレーションのためのパラメータ設定

京阪神都市圏第3回パーソントリップ調査（1990年）の個票データを、大阪府内の67市区町村ごとに集計し、各市区町村から大阪市都心2区（北区、中央区）へのトリップ数と、それらトリップに要した平均所要時間を求めた。さらにトリップ数を各市町村の人口で割ったものを、1人当たりトリップ数とした。都心までの空間距離は、各市区町村の中心から大阪市役所までの直線距離を地図上で計測した。

ここで求めるべきパラメータは、 $B, a, b, c, f$ である。

---

<sup>11</sup> Kraus(1990)はこの費用を数値計算に含めた。

まず都市圏の外側境界までの距離  $B$  を 50km とした。大阪都心から最も遠距離にあるのは南部の岬町 (59km) であるが、その隣の阪南市が 48km で、その間がかなり離れていること、および北部で最遠なのが能勢町 (39km) であることを考慮して決めたものである。

需要関数のパラメータ  $a, b$  は次のように求めた。まず  $a$  は需要がゼロになる (すべての人がトリップを断念する) ほどの禁止的トリップ費用の水準といえるが、大阪都心を目的地とするトリップの中で最長時間が 120 分であったことを考慮して、 $a = 130$  とした。そして需要曲線が、都心 2 区以外で最もトリップ数の多い地区の (トリップ数、所要時間) の座標を通るように  $b$  を設定することにより  $b = 498$  を得た。以上のように需要関数を設定することは、トリップの便益が時間(分)の単位で表わされることを意味する。したがって計算された料金も分の単位になる。これらを金額の単位に直すためには別途推定された時間評価値を乗ずる必要がある。

費用関数のパラメータの内、 $f$  は自由走行時 (混雑がない) の単位距離当たり所要時間なので、自由走行時の速度を 50km/h と仮定して  $f = 1.2$  とした。実際の大阪都市圏は一次元でも、単一中心でもないが、本モデルの設定と整合的なパラメータ  $c$  の値を求めるため、以下のような方法を用いる。

まず上で既に求めたパラメータを式(5-9)に代入すると、 $q^*(x)$  は  $x$  と  $c$  のみの関数となる。さらにこれを式(5-2)に代入することにより、 $Q(x)$  も  $x$  と  $c$  の関数として求められる。いま地区  $i$  が都心から  $x_i$  の距離にあるものとしよう。このとき本モデルの設定では、この地区から都心までの所要時間は次の  $T(x_i, c)$  のように計算される。

$$T(x_i, c) = fx_i + c \int_0^{x_i} Q(y) dy$$

そこで上のように計算された  $T(x_i, c)$  が、実際に観測された地区  $i$  からの所要時間  $\bar{T}_i$  と最も適合するように、すなわち残差二乗和、 $\sum_{i=1}^{67} [T(x_i, c) - \bar{T}_i]^2$  を最小化する  $c$  を探索する。以上のように求めた値は、 $c = 0.52$  である。

## 第6章 非単一中心都市への拡張\*

### 6-1 はじめに

第5章では、単一中心都市における最適なコードンプライシングを求める問題を検討した。そこではコードンプライシングが最適に設計された場合、ほぼ社会的最適と同等の経済厚生を達成することが示された。前章では解析的な結論を得るため、単一中心都市、線形の需要関数、均一な人口分布、均一な道路容量などの仮定を導入してモデルを単純化していたが、本章では上の仮定を緩め、より現実的な設定のもとでコードンプライシングの効果を分析することとする。

モデルの定式化に関する最も重要な変更は非単一中心都市への拡張である。単一中心都市では、都市内の各地点から発生するトリップがすべて都心を目的地としていた。したがってコードンの外側から発するトリップは必ずコードンを通過せねばならず、料金を課される。一方、非単一中心都市では、都市内の各地点から発生したトリップが都市内のあらゆる地点に向かう。このときコードンを通過しないよう（料金支払いを回避するよう）に目的地を選ぶことができる点が前章のモデルと大きく異なっている。また、より現実的な需要関数を用いるとともに、人口密度や道路容量の空間分布も考慮する。以上のようなモデルを用いて、都市の空間構造や様々なパラメータの変化が交通流動と混雑の状態そしてコードンプライシングの有効性にどのような影響を与えるかを調べる。

### 6-2 モデル

#### 6-2-1 無料金均衡

Solow and Vickrey (1971)と同様の線形都市を仮定する。この都市では長さ方

---

\* 本章は、Mun, Konishi, Yoshikawa (2005)に基づいている。



向のトリップのみが行われる<sup>1</sup>。図 6-1 のように、都市内の立地点は、都市の中心を原点とする一次元空間上の座標値  $x$  として表され、都市の境界は右端が  $B$  で左端が  $-B$  である。したがって都市の大きさは  $2B$  に等しい。都市には同質の個人が立地し、人口密度は関数  $n(x)$  によって与えられる。人口密度は都心 ( $x=0$ ) で最も大きく、そこから離れるにしたがって減少するものと仮定する。都市の総人口は  $\int_{-B}^B n(x)dx$  に等しい。

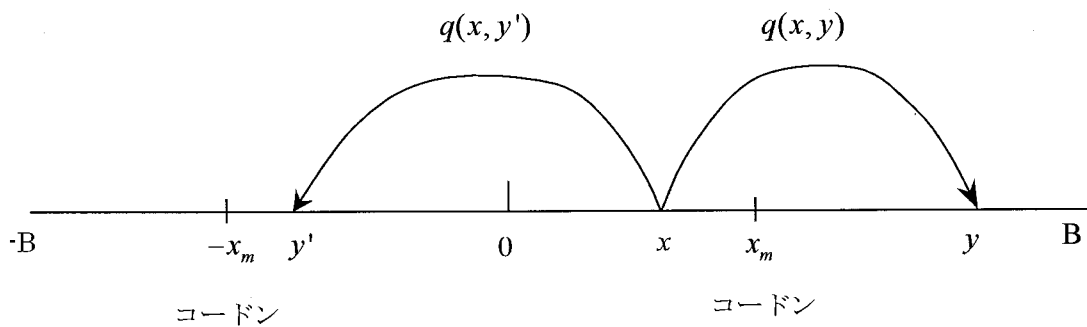


図 6-1 モデルにおける都市空間の設定

各地点に立地する個人が行うトリップの目的地は都心に限定されることはなく、都市内に分散している。トリップの回数は、料金と時間費用の合計であるトリップ費用に依存する。また時間費用はトリップ途上の混雑水準に依存して変動する。

いま地点  $x$  に立地する個人が地点  $y$  へ行うトリップ数を  $q(x, y)$  と表そう。無料金均衡は、すべての O-D（出発地—目的地）の組合せについて、私的限界便益とトリップ時間費用が等しくなるとき、達成される。

$$P(q(x, y)) = C(x, y) \quad \text{for all } x, y \quad (6-1)$$

ここに  $P(q)$  は逆需要関数であり、トリップの限界便益を表している。また  $C(x, y)$  は  $x$  から  $y$  へのトリップ時間費用であり、次のように定義される。

$$C(x, y) = \int_x^y t \left( \frac{Q(z)}{W(z)} \right) dz. \quad (6-2)$$

<sup>1</sup> この仮定は分析上の都合で導入されたものであるが、一部の地域では現実的である（た

ここに  $t(Q(z)/W(z))$  は、地点  $z$  の近傍で単位距離を走行するのに要する時間であり、 $Q(z)$  と  $W(z)$  は、それぞれ地点  $z$  における通過交通量と道路容量である。関数  $t(\bullet)$  の値は交通量-道路容量比率とともに増加するものと仮定する。通過交通量はトリップ途上に地点  $z$  を含む O-D トリップの総数であり、次式のように定義される。

$$Q(z) = \int_{-B}^z \int_z^B n(x)q(x,y)dydx + \int_z^B \int_{-B}^z n(x)q(x,y)dydx \quad (6-3)$$

式(6-3)の右辺第1項は、地点  $z$  を左から右へ通過するトリップの総数を表し、第2項は右から左への通過数である<sup>2</sup>。

### 6-2-2 社会的最適

社会的最適では、各 O-D の組合せについて社会的限界便益が社会的限界費用に等しくならねばならない。すなわち

$$P(q(x,y)) = C(x,y) + E(x,y), \quad \text{for all } x,y \quad (6-4)$$

$$E(x,y) = \int_x^y t' \left( \frac{Q(z)}{W(z)} \right) \frac{Q(z)}{W(z)} dz. \quad (6-5)$$

ここに  $E(x,y)$  は混雑外部性を表す。すなわち地点  $x$  で発生する追加的トリップが  $x$  から  $y$  に至る区間で、同区間を利用する全車両の速度をわずかながら低下させることによる損失の合計である。社会的最適解は混雑外部性に等しくなるように料金を課すことで達成されるが、前章に述べたように料金徴収に多大な労力を要することや他の理由で実行は困難である。本研究ではこのケースを代替的政策として考えるのではなく、次善の政策であるコードンプライシングの効果を相対的に評価するための参照点として用いる。

### 6-3 非単一中心都市における最適なコードンプライシング

---

たとえば Tong and Wong (1997))。

<sup>2</sup> 本稿では、一日の交通混雑について扱っている。 $q(x,y)$  は  $x$  から  $y$  へのトリップ数を表しているが、同じ日に同じ数のトリップが  $y$  から  $x$  に戻る必要がある。式(6-3)のような  $Q(z)$  の定式化は、一方向について往路と復路のトリップが含まれることを意味する。たとえば右側車線についてみると、式(6-3)の右辺第1項と第2項は、それぞれ往路と復路のトリップを表している。左側車線については逆である。

コードンが  $x_m$  と  $-x_m$  に設定され、 $\tau$  に等しい料金がコードンを通過する全車両に課せられるものとする。コードンプライシングのもとでの均衡は、次の条件で表される。

$$P(q(x, y)) = C(x, y) + \psi(x, y)\tau, \quad \text{for all } x, y \quad (6-6)$$

ここに  $\psi(x, y)$  は  $x$  から  $y$  へのトリップ途上でコードンを通過する回数であり、下記のように与えられる。

$$\psi(x, y) = |h(x) - h(y)| \quad (6-7)$$

ここに、 $h(x) = -1$  for  $-B \leq x < -x_m$

$h(x) = 0$  for  $-x_m \leq x < x_m$

$h(x) = 1$  for  $x_m \leq x < B$

一部の O-D（例えば  $-x_m$  の左側から  $x_m$  の右側へのトリップ）については、ドライバーは料金を二回払わなければならない<sup>3</sup>。

最適なコードンプライシングは、下の社会的余剰を最大化するように料金水準とコードンの位置を定める政策である。

$$\text{Max}_{x_m, \tau} \int_{-B}^B n(x) \left[ \int_{-B}^B \left[ \int_0^{q(x, y)} P(q) dq - C(x, y)q(x, y) \right] dy dx \right] \quad (6-8)$$

制約条件は均衡条件の式(6-6)と(6-7)である。

前章とは異なり、最適なコードンプライシングについて、解析的に結果を導くことは困難なので、数値シミュレーションを行う。その際、制御変数が  $x_m$  と  $\tau$  の2つだけなので、格子点探索(Grid Search)によって最適解を求める。

## 6-4 シミュレーション

### 6-4-1 関数形およびパラメータ値の設定

トリップ需要関数を次のように特定化する<sup>4</sup>。

<sup>3</sup> 一次元空間を想定しているため、コードン周辺の迂回路のように、料金支払を回避できる経路を選択することはできない。

<sup>4</sup> (6-9)のような需要関数は個人の効用最大化問題の解として得られる。詳しくは付論を参照されたい。

$$q(x, y) = am(y) \exp(-bP(x, y)) \quad (6-9)$$

ここに  $a$ 、 $b$  は正の定数である。また、 $m(y)$  は地点  $y$  での経済活動の水準（例えば、人口）で、目的地のトリップ吸引力を表す。 $P(x, y)$  は  $x$  から  $y$  へのトリップ費用であり、時間費用と料金からなる。 $x$  から  $y$  への集計トリップ数は、 $an(x)m(y) \exp(-bP(x, y))$  として得られるが、これは指数型重力モデルと同じ形である。上のような特定化のもとではトリップ目的地間の代替弾力性が 0 になるが、目的地間の代替はシェアの変化を通じて間接的に表される。ある目的地へのトリップ費用が下落するとその目的地へのトリップが増加するが、ほかの目的地へのトリップ数は不変である。このとき前者のシェアは増加し後者のシェアは減少する。需要関数(6-9)より、次のような逆需要関数（トリップの限界便益）が導かれる。

$$P(q(x, y)) = -\frac{1}{b} \ln \left( \frac{q(x, y)}{am(y)} \right) \quad (6-10)$$

京阪神パーソン・トリップ調査の大阪府に関するデータに基づいてパラメータ値を推定した結果、 $a = 1.48 \times 10^{-7}$ 、 $b = 0.0312$  が得られた。

人口密度関数は多くの文献で用いられている（例えば McDonald (1989)）指数型を採用する。

$$n(x) = d \exp(-g|x|) \quad (6-11)$$

ここに  $d = 24500$ 、 $g = 0.0854$  である。同様に目的地の吸引力  $m(y)$  は、以下のような密度関数で表される。

$$m(y) = \delta \exp(-\gamma|y|) \quad (6-12)$$

ここに、 $\delta, \gamma$  は、基本ケースではそれぞれ  $d, g$  に等しいと仮定する。

道路容量  $W(x)$  についても指数関数として特定化し、

$$W(x) = k \exp(-v|x|) \quad (6-13)$$

道路容量については、道路面積-市街地面積比率を代理指標としてパラメータを推定した。その結果、 $k = 0.24$ 、 $v = 0.0446$  となった。

単位距離あたり走行時間（単位は分）は、交通量-道路容量比率に対し線形である<sup>5</sup>。すなわち、

<sup>5</sup> 線形の走行時間関数は誘導型と解釈することができる。第3章の3-3-2で示したように、

$$t\left(\frac{Q(x)}{W(x)}\right) = f + c\left(\frac{Q(x)}{W(x)}\right) \quad (6-14)$$

ここに、 $f=1.2$ ,  $c=0.00000552$ である。これらの値については、前章の付論で示したものと同様の手法で推定した。最後に、都心から都市境界までの距離  $B$  は 50km とする。

#### 6-4-2 基本ケースの結果

無料金均衡、社会的最適およびコードンプライシングという、3通りのシステムの相対的な効果を評価するため、数値シミュレーションを行う。基本ケースでは、 $m(y)=n(y)$ とする。これは、Beckmann (1976)が分析した Dispersed City と同様の設定であり、都市内のトリップの目的地が完全に分散していることを意味する。基本ケースの計算結果については、以下の通り。

$$x_m = 13 \text{ km} \quad \tau = 19 \text{ 分}$$

$$SS_{\text{Notoll}} = 7.731\text{E}+08 \text{ 分}$$

$$SS_{\text{Cordon}} = 8.008\text{E}+08 \text{ 分}$$

$$SS_{\text{Firstbest}} = 8.397\text{E}+08 \text{ 分}$$

$$\text{最大の厚生改善} = \frac{SS_{\text{First best}} - SS_{\text{No toll}}}{SS_{\text{No toll}}} = 0.086$$

$$\text{コードン料金による厚生改善} = \frac{SS_{\text{Cordon}} - SS_{\text{No toll}}}{SS_{\text{No toll}}} = 0.036$$

$$\text{コードン料金の相対的効果} = \frac{SS_{\text{Cordon}} - SS_{\text{No toll}}}{SS_{\text{First best}} - SS_{\text{No toll}}} = 0.415$$

ここに、 $SS_{\text{Notoll}}$ 、 $SS_{\text{Cordon}}$ 、 $SS_{\text{Firstbest}}$  はそれぞれ、無料金均衡、最適なコードンプライシングおよび社会的最適のもとでの社会的余剰を時間単位で評価したものである。最適なコードンの位置は都心から 13km で、時間単位で表した最適料金は 19 分である。移動時間の価値を 2000 円/時とすると、料金は 633.3 円となる。以下、二つの指標を用いてコードンプライシングの有効性を評価する。一つは

---

Vickrey 型のボトルネックモデルでは、動的均衡のもとでのトリップ費用がラッシュアワーにおけるトリップ総数と道路容量の比に比例する。式(6-14)における  $Q(z)$  は、脚注 2 に述べたように一日あたりの交通量を表すので、定義としても整合している。

「コードン料金による厚生改善」で、これは無料金均衡と比べた社会的総余剰の増加率で定義される。もう一つは「相対効果」で、これはコードン料金による厚生改善と社会的最適による最大の厚生改善との比率である。相対効果は 0 と 1 の間の値を取り、その値が 1 に近づくことはコードンプライシングが社会的最適（ファーストベスト）に近づくことを意味する。基本ケースではコードンプライシングを導入することで、社会的余剰が無料金均衡よりも 3.6% 改善され、これは最大厚生改善の 41.5% に相当する。単一中心、密度 1、線形需要関数などを仮定した前章での結果に比べ、コードンプライシングによる厚生改善はかなり小さい<sup>6</sup>。

図 6-2 は、交通量-道路容量比率で表される混雑水準の空間的変動を示している<sup>7</sup>。図では、明らかにコードンプライシングの導入によってコードン周辺での混雑水準が低下している。ただし、他の地点については、コードンプライシングのもとでの混雑水準は無料金均衡の場合と大きく差がない。これは、個人がコードンを通過するトリップを減らす一方で、コードンを通過しないトリップを増やしていることを示唆している。このことを確認するため、O-D トリップの変化について詳しく見よう。

---

<sup>6</sup> 前章のモデルによる相対効果の値を、表 5-2 から計算すると 94% になる。

<sup>7</sup> 交通量と道路容量の単位が違いため、縦軸の値は大きくなっている。道路容量は道路面積率で代用しているので、最大値は式(6-13)より 0.24 である。これに対し交通量は一日あたりのトリップ数である。

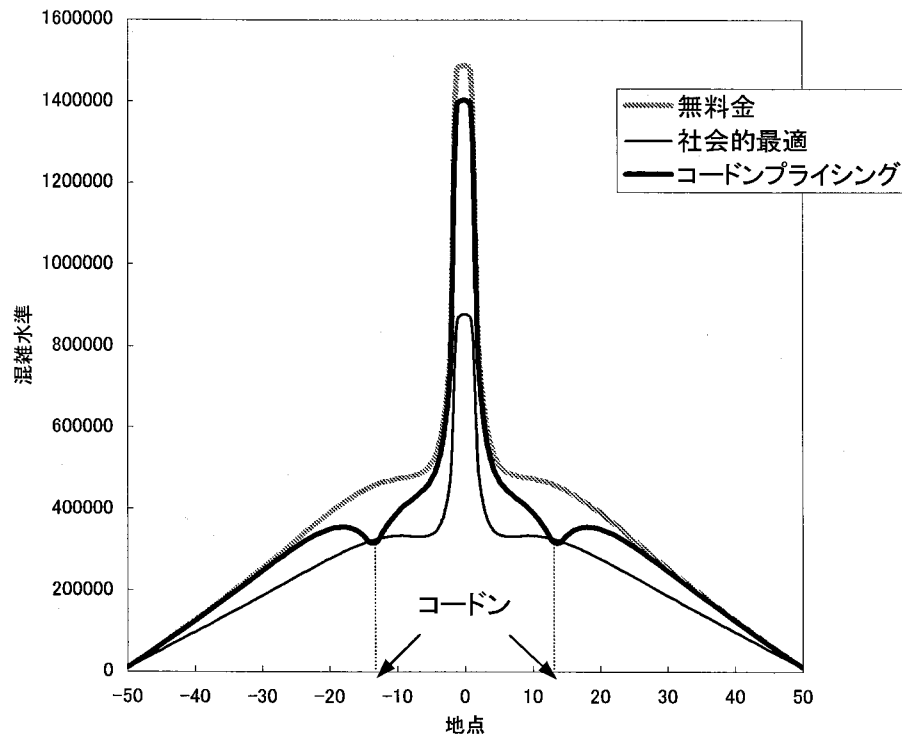


図6-2 3通りの料金制に対する混雑水準の空間的変動

表 6-1(a)、(b)には、コードンプライシングと無料金均衡および社会的最適のもとでの O-D トリップ数を比較したものである。表には、いくつか代表的な地点を選び、それらの間の O-D トリップ数の差異が示されている。代表的な地点として、1 (都心)、6 (都心周辺)、12 (コードンのすぐ内側)、14 (コードンのすぐ外側)、25 (近郊部)、そして 35 (外縁部) を選んだ。表中の各セルには下の式により計算された交通量変化の符号を示している。

表 6-1(a):  $(q^{**}(x,y) - q^*(x,y))$

表 6-1(b):  $(q^{**}(x,y) - q^o(x,y))$

ここに、 $q^*(x,y)$ 、 $q^o(x,y)$ 、 $q^{**}(x,y)$ は、それぞれ無料金均衡、社会的最適、そして最適なコードンプライシングのもとでの、 $x$  から  $y$  への O-D トリップ数である。

表6-1(a) コードンプライシングと無料金均衡のもとでのOD交通量の差

		コードン内側領域										
D \ O		-35	-25	-14	-12	-6	1	6	12	14	25	35
コードン 内側領域	-35		+	+	-	-	-	-	-	-	-	-
	-25	+		+	-	-	-	-	-	-	-	-
	-14	+	+		-	-	-	-	-	-	-	-
	-12	-	-	-		+	+	+	+	-	-	-
	-6	-	-	-	+		+	+	+	-	-	-
	1	-	-	-	+	+		+	+	-	-	-
	6	-	-	-	+	+	+		+	-	-	-
	12	-	-	-	+	+	+	+		-	-	-
	14	-	-	-	-	-	-	-	-		+	+
	25	-	-	-	-	-	-	-	-	+		+
	35	-	-	-	-	-	-	-	-	+	+	

表6-1(b) コードンプライシングと最適な料金のもとでのOD交通量の差

		コードン内側領域										
D O		-35	-25	-14	-12	-6	1	6	12	14	25	35
コードン 内側領域	-35		+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
	-25	+		+	-	+	+	+	+	+	+	+
	-14	+	+		-	-	-	+	+	+	+	+
	-12	+	-	-		+	+	+	+	+	+	+
	-6	+	+	-	+		+	+	+	+	+	+
	1	+	+	-	+	+		+	+	-	+	+
	6	+	+	+	+	+	+		+	-	+	+
	12	+	+	+	+	+	+	+		-	-	+
	14	+	+	+	+	+	-	-	-		+	+
	25	+	+	+	+	+	+	+	-	+		+
	35	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	



表 6-1(a)は、コードンプライシングと無料金均衡の差を示している。これは初期に無料金均衡が実現している状況でコードンプライシングが導入された場合の O-D トリップ数の増減を表すものである。正の符号は、コードンプライシングのもとでのトリップ数が、無料金のケースより多いことを表している。表より明らかなように、コードンプライシングの導入によってコードンを通過する OD トリップはすべて減少しているのに対し、通過しない OD トリップは増加している。これは、個人が料金の支払いを回避するために、目的地を変更していることを意味する。こういった個人の反応を集計すると、コードン周辺の通過交通量が社会的最適のもとでの交通量をも下回るほど減少するのである(図 6-2)。

表 6-1(b)では、コードンプライシングと社会的最適のもとでのトリップ数の乖離が示されている。正の符号は、当該 O-D ペアについてトリップ数が過大になっていることを意味する。表より、コードンを通過する短距離のトリップ数は過小である一方、他のタイプのトリップ数が過大となっていることが分かる。この結果は、単一中心都市を想定した第 5 章の分析結果と整合している。なおここではコードンを二回通過するトリップについて料金が二回徴収されるものと想定している。ところが表を見るとそのようなトリップは料金を二回支払わなければならないにもかかわらず、なお過大になっている。コードンを二回通過するトリップは長距離なので、その途上で及ぼす外部効果は料金の 2 倍よりもまだ大きいことを意味する。シンガポールでは、本研究の設定とは異なり、コードンを二回通過するトリップに対する料金徴収は一回分に留めている。しかし上の結果は、料金を 2 回徴収して長距離トリップを抑止することの方が、効率性を改善するためには有効であることを示唆している。

以下では、コードンプライシングがいかなる場合に有効（あるいは無効）であるかを明らかにするため、都市構造や様々なパラメータの影響を調べる。

#### 6-4-3 都市の空間的構造による影響

本モデルでは、トリップの発生および吸引の要因である、経済活動の空間的分布がそれぞれ密度関数  $n(x)$ 、 $m(x)$  で表される。これら二つの密度関数の勾配を変化させることを通じて、都市の空間構造が与える影響を分析する。 $n(x)$  の勾

配を一定とし、 $m(x)$ の勾配が大きくなったとしよう。この変化は、都市の空間構造が単一中心に近づくものと解釈できる（図 6-3）。 $n(x)$ と  $m(x)$ の勾配は、それぞれ式(6-11)と(6-12)のパラメータ  $g$  と  $\gamma$  で表されるので、 $\gamma/g$ が増加するにつれ都市の単一中心性が高まると考える。極端な例として、前章のようにすべてのトリップが CBD に向かうとき、都市は完全に単一中心となる。これは、 $\gamma$  が非常に大きい値をとるケースとして表される。

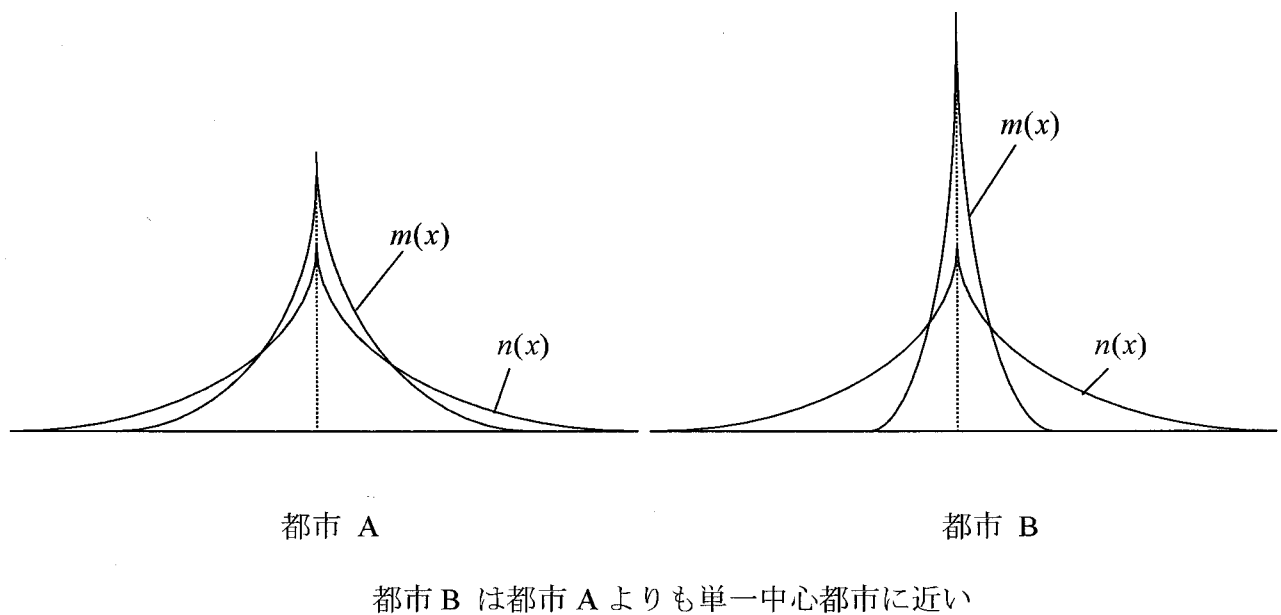


図 6-3 都市空間構造の表現

$n(x)$ のパラメータを基本ケースと同じ値に固定したもとの、 $m(x)$ のパラメータ  $\gamma$ の値を変化させ、それに対する解を計算する。その際、 $\int_{-B}^B m(x)dx$ の値が一定となるように  $m(x)$ におけるもう一つのパラメータ  $\delta$ の値が調整される。これは、トリップ吸引力の全体的な水準が変化するという規模の効果を排除し、トリップ目的地の空間分布の変化のみに焦点をあてるためである。

表 6-2 と図 6-4 にシミュレーションの結果を示す。

表6-2 都市の空間構造による影響 (1):  $m(x)$ の勾配

	基本ケース	10%	50%
コードンの位置	13	3	0
料金	19	28	25
$SS_{Notoll}$	7.731E+08	3.985E+08	1.621E+08
$SS_{Cordon}$	8.008E+08	4.603E+08	1.917E+08
$SS_{Firstbest}$	8.397E+08	4.864E+08	1.939E+08
最大の厚生改善	0.086	0.220	0.196
コードン料金による厚生改善	0.036	0.155	0.182
コードン料金の相対的効果	0.415	0.703	0.931

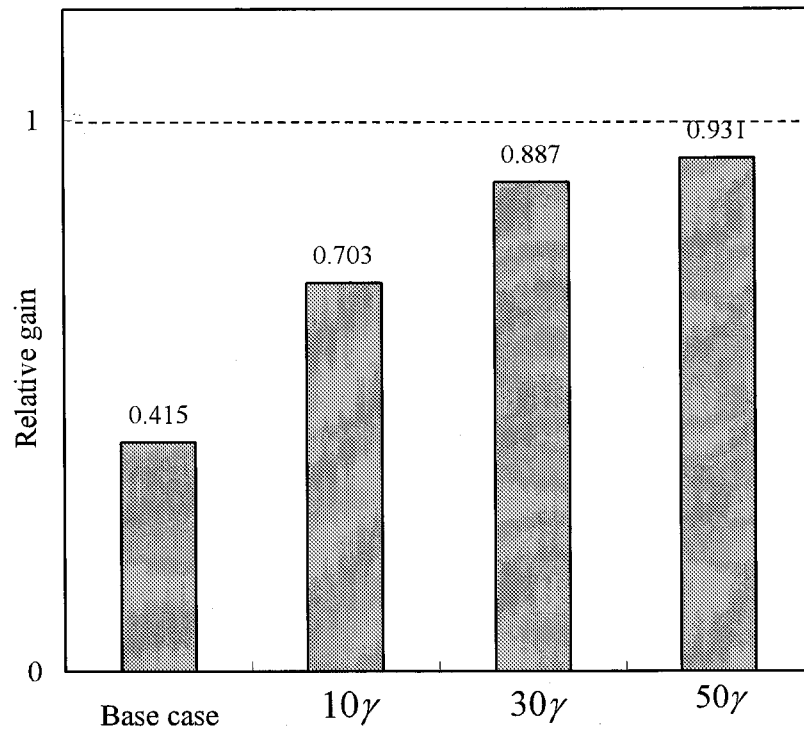


図6-4 都市の空間構造とコードンプライシングの効果

図より、トリップの目的地が中心部に集中すると、コードンプライシングの相対的効果が増加する。このことは、都市構造が単一中心に近くなるほどコードンプライシングがより有効であることを意味する。非単一中心都市では、コードン通過を回避するようにトリップ目的地の選択を調整することができたが、単一中心都市ではすべてのトリップが都心に向かうため、そのような調整が不可能になるからである。

次に全体的な人口密度勾配の変化、すなわち  $n(x)$  と  $m(x)$  の勾配がともに変化する場合の影響を調べる。表 6-3 にその結果が示されている。コードンプライシングによる厚生改善と相対的効果はともに、密度勾配の上昇に伴い増加している。最適なコードンの位置は、密度勾配の上昇とともに都心に近づく。これは、コードンを通過する車両をより多く捕捉するためである。

表6-3 都市の空間構造の影響 (2): 全体的な人口密度勾配

	0.5g	基本ケース	1.5g
コードンの位置	23	13	8
料金	18	19	19
$SS_{Notoll}$	7.505E+08	7.731E+08	8.119E+08
$SS_{Cordon}$	7.743E+08	8.008E+08	8.452E+08
$SS_{First\ best}$	8.093E+08	8.397E+08	8.878E+08
最大の厚生改善	0.078	0.086	0.093
コードン料金による厚生改善	0.032	0.036	0.041
コードン料金の相対的効果	0.405	0.415	0.438

#### 6-4-4 パラメータの効果

トリップ需要の弾力性の影響を調べる。式(6-9)のように関数形が特定されているので、トリップ需要の価格弾力性  $\varepsilon$  は、次のように定義される。

$$\varepsilon = -\frac{dq}{dP} \frac{P}{q} = bP$$

上の式よりパラメータ  $b$  の値が大きくなるほど弾力性が高くなる。表 6-4 は、三通りの  $b$  の値に対応した結果を示している。表より、最大の厚生改善とコードンプライシングによる厚生改善のいずれもが、 $b$  の値の上昇に伴い減少している。すなわち弾力性が低いほどコードンプライシングがより有効となる。これは、Santos, Newbery, and Rojey (2000)で導かれた結果と反対である。実際のところ、 $b$  が厚生改善に及ぼす影響は曖昧である。厚生改善は  $b$  の変化に対し増加することもあるれば減少することもある。これは  $b$  が極端に小さい場合、大きい場合のいずれにおいても、料金政策による厚生改善が小さくなることから理解できる。本分析で想定したパラメータのもとでは、 $b$  の上昇にともなって、コードンプライシングによる厚生改善の方が最大の厚生改善よりも大きく減少している。結果として、相対的效果が  $b$  の上昇とともに減少する。

表6-4 需要の弾力性の影響

	$0.5b$	基本ケース	$1.5b$
コードンの位置	10	13	13
料金	39	19	12
$SS_{Notoll}$	2.055E+09	7.731E+08	4.270E+08
$SS_{Cordon}$	2.148E+09	8.008E+08	4.395E+08
$SS_{First\ best}$	2.247E+09	8.397E+08	4.598E+08
最大の厚生改善	0.093	0.086	0.077
コードン料金による厚生改善	0.045	0.036	0.029
コードン料金の相対的效果	0.485	0.415	0.380

表 6-5 は、道路容量の影響を示している。ここでは都市全域で道路容量が均等に変化する状況を想定する。このような道路容量の増加は、式(6-13)におけるパラメータ  $k$  の増加によって表される<sup>8</sup>。道路容量が小さいほど、料金政策の効

<sup>8</sup>  $k$  の増加による影響は、式(6-14)における  $c$  の減少と同じ影響を与える。

果はいずれも大きくなる。この結果は直感とも整合する。すなわち道路容量が小さいほど無料金均衡における混雑が激しいので、料金政策による厚生改善効果が大きくなるのである。

同じ料金システムのもとで、異なる道路容量に対する社会的余剰の差は道路容量拡大の便益を表している。コードンプライシングのもとでの道路容量拡大便益は、無料金均衡および社会的最適のもとでよりも大きい。たとえば表 6-5 によると基本ケースから 50%増加した場合 (1.5k)、それぞれの料金政策のもとで道路容量拡大の便益は、以下のように計算される。

$$\text{無料金均衡：} \quad 8.627\text{E}+8 - 7.731\text{E}+8 = 0.896\text{E}+8$$

$$\text{コードンプライシング：} \quad 8.923\text{E}+8 - 8.008\text{E}+8 = 0.916\text{E}+8$$

$$\text{社会的最適：} \quad 9.284\text{E}+8 - 8.397\text{E}+8 = 0.887\text{E}+8.$$

これより、コードンプライシングのもとでは道路容量拡大便益が他の料金政策のもとでの値よりも大きくなる。その結果、コードンプライシングによる相対的な厚生改善が大きくなるのである。

表6-5 道路容量の影響

	0.5k	基本ケース	1.5k
コードンの位置	14	13	11
料金	21	19	17
$SS_{Notoll}$	6.313E+08	7.731E+08	8.627E+08
$SS_{Cordon}$	6.547E+08	8.008E+08	8.923E+08
$SS_{First\ best}$	6.964E+08	8.397E+08	9.284E+08
最大の厚生改善	0.103	0.086	0.076
コードン料金による厚生改善	0.037	0.036	0.034
コードン料金の相対的効果	0.360	0.415	0.451

## 6-5 おわりに

本章では、トリップが都市内のあらゆる地点間で行われるという非単一中心都市における交通混雑の空間モデルを構築した。そして3通りの料金政策（無料金均衡、社会的最適、および最適なコードンプライシング）のもとでの経済的厚生を評価した。数値シミュレーションで示したように、コードンプライシングは常に有効というわけではなく、導入効果は都市の空間的構造やその他のパラメータに依存する。

シミュレーションの結果をまとめると、コードンプライシングが相対的に有効となるのは次の場合である。

都市の空間的構造が単一中心構造に近い。

密度勾配が急である。

トリップ需要の弾力性が小さい。

道路容量が大きい。

上の結果は、コードンプライシングが小規模な都市においてより有効であることを示唆している。都市経済学の理論によると、都市規模が小さい場合、都市の空間的構造は単一中心構造に近づき、密度勾配は急になる。大都市では代替的交通手段の利用可能性が高いが、そのとき自動車トリップの需要はより弾力的である。ただ都市規模と道路容量の関連性に関しては十分な実証的根拠がない。いずれにせよコードンプライシングの導入を考慮する政策担当者は、対象とする地域の諸条件を十分検討する必要がある。

### 付論： 効用最大化と需要関数

式(6-9)の需要関数は、次の効用関数から導かれる。

$$U = Z + \frac{a}{b} \int_{-B}^B \int_0^{m(y)} \left[ s(x, y, j) - \left( \frac{s(x, y, j)}{a} \right) \ln \left( \frac{s(x, y, j)}{a} \right) \right] dj dy$$

ここに  $Z$  はトリップを伴わない合成財の消費であり、 $s(x, y, j)$  は  $x$  に立地する個人が  $y$  にある  $j$  番目の訪問先に向かうトリップ数である。上の効用関数は訪問先の数が多いほど、個人の効用が高くなることを意味する。予算制約式は、

$$I = Z + \int_{-B}^B \int_0^{m(y)} P(x, y) s(x, y, j) dj dy.$$

である。予算制約のもとでの効用最大化の条件により、次のような関係式が得られる。

$$s(x, y, j) = a \exp(-bP(x, y))$$

目的地  $y$  へ向かうトリップの総数  $q(x, y)$  は、 $y$  にある訪問先  $j$  について  $s(x, y, j)$  を集計することにより求められる。

$$q(x, y) = \int_0^{m(y)} s(x, y, j) dj = am(y) \exp(-bP(x, y))$$

上式は式(6-9)と同じものである。



## 第 III 部 ネットワーク

## 第7章 交通量配分と次善の混雑料金

### 7-1 はじめに

第1章で述べたように、経済学における交通混雑の標準的モデルは、単一のしかも均質な道路区間を対象としていた。一方、実際の都市では様々な長さ、容量を持った道路がネットワークを構成しており、道路ごとに混雑の水準も異なっている。道路利用者は各道路の交通状況を考慮して経路を選択するが、そのような選択の結果として各道路の混雑水準が決まる。混雑を緩和するための料金政策を検討する際には、それが利用者の経路選択行動に与える影響を考慮して、どの道路でいくらの料金を徴収すべきかを計算する必要がある。

第III部では、混雑料金がネットワークにおける交通量配分に及ぼす効果に着目する。一般に混雑の外部性がある場合、ドライバーの自由な経路選択の結果達成される均衡交通量配分は社会的に効率的ではない。効率的な交通量配分を実現するには、すべての道路において混雑の外部効果に等しい額の料金を徴収する必要がある（Smith(1979)）。しかしすべての道路の分岐点や交差点にチェックポイントを設けて料金を徴収することは不可能でないにしても、そのために要する労力や資源の大きさを考えると合理的な手段とはいえない。そこで次善の政策として、一部の道路区間においてのみ料金を徴収することにし、その料金を調節することによりネットワーク全体の交通量配分の効率性を改善する可能性に着目する。たとえば日本では、東京の首都高速道路や大阪の阪神高速道路ではいくらかの料金徴収が実際に行われている。有料の高速道路で料金を上げると、一部の車は無料の一般道路を利用するようになる。このとき有料道路における混雑は減少するが、一般道路では混雑が激化する。このように、一部の道路でのみ料金を徴収する場合でもネットワーク全体に影響を及ぼすのである。

本章では、二地点を結ぶ道路が複数存在するときに、一部の道路でのみ料金徴収可能なときの次善最適料金を導出する<sup>1</sup>。そしてこのような料金がドライバーの経路選択と混雑の緩和に及ぼす影響を分析する。さらにドライバーの時間評価値が異なる場合についてモデルを拡張し、同様の分析を行うこととする。

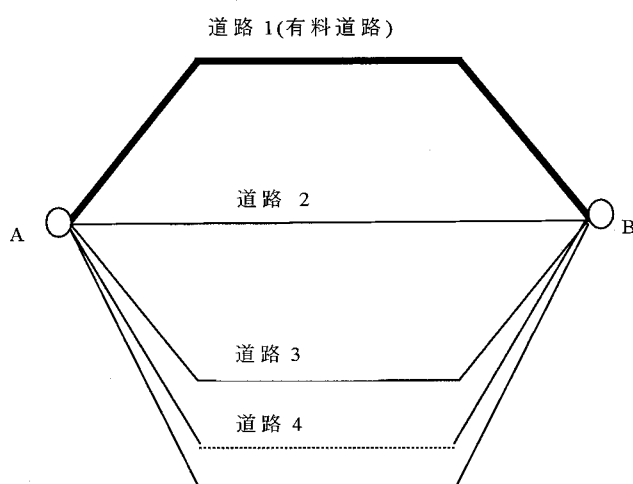


図 7-1 分析対象道路システム

## 7-2 モデル

最も単純な状況を想定する。図 7-1 に示すように、空間的に離れた二つの地点 A, B の間に有料道路が一本、そして一般街路が  $I-1$  本存在するものとする。A から B への交通需要は  $N$  であり、交通手段は自動車のみであると仮定する。したがって各個人 (= ドライバー) は上記の  $I$  本の道路の内いずれかを利用して目的地へ向かう。トリップに要する費用は所要時間に比例する時間費用 (走行費用) と、道路料金の和として定義される一般化費用である。所要時間は通過交通量の関数であり、 $t_i(q_i)$  と表すものとする。ここに  $q_i$  は経路  $i$  を利用する交

<sup>1</sup> 本章は文(1993)に基づいている。Verhoef, Nijkamp, Rietveld (1996)、Small and Yan (2001) らによって同様の分析を行った論文が発表されたが、発表時期からもわかるように、本研究はそれらとは独立に行われたものである。

通量である。そして  $t_i(q_i)$  は  $q_i$  の増加凸関数であると仮定する。各ドライバーは、トリップ費用の最小となる経路を選択する。そして均衡に達したとき、どのドライバーも経路を変更する誘因を持たないので、利用されているすべての道路のトリップ費用は等しくなる。

### 7-2-1 無料金均衡

有料道路を含め、すべての道路で料金が徴収されない場合、各ドライバーは時間費用のみを考慮する。均衡が達成されたときに各経路で等しくなる時間費用を  $C^*$  と表せば、均衡条件は次のように定式化される。

$$\text{if } q_i > 0, \quad c_i(q_i) = C^* \quad (7-1a)$$

$$\text{if } q_i = 0, \quad c_i(q_i) > C^* \quad (7-1b)$$

$$\sum_{i=1}^I q_i = N \quad (7-2)$$

ここに

$$c_i(q_i) = \alpha t_i(q_i) \quad (7-3)$$

であり、 $\alpha$  はドライバーの時間評価値である。

### 7-2-2 最適な交通量配分

最適な交通量配分とは、 $N$  台の車両が A から B まで走行するのに要する総費用を最小化するように、各道路の交通量を決めることである。

解くべき問題は

$$\text{Min}_{q_i} \sum_{i=1}^I c_i(q_i) q_i \quad (7-4)$$

$$\text{subject to } \sum_{i=1}^I q_i = N \quad (7-2)$$

$$q_i \geq 0, \quad i = 1, 2, \dots, I \quad (7-5)$$

である。上の問題の最適条件は次の通り。

$$q_i > 0, \quad c_i(q_i) + c'_i(q_i) q_i = C^o \quad (7-6a)$$

$$q_i = 0, \quad c_i(q_i) + c'_i(q_i) q_i > C^o \quad (7-6b)$$

および(7-2)。

ここに  $C^0$  は制約条件式(7-2)に関する Lagrange 乗数である。上の式の左辺の第2項は、その道路を利用するある一台の車が、同じ道路を走行するすべての車に及ぼす混雑の外部効果である。無料金の場合、各ドライバーはこのような外部効果を認識せずに経路選択を行うために、効率的な交通量配分が達成されないのである。上の条件はまた、すべての道路で外部効果（＝左辺第2項）に等しい額の料金を徴収すると、（時間費用＋料金）により定義される一般化費用に関する利用者均衡のもとで最適な交通量配分が達成されることを意味している。しかし、7-1 でも述べたように、すべての道路に料金所を設置し、料金を徴収することは困難であるばかりでなく、社会的に受容もされ難いであろう。

### 7-2-3 有料道路料金による次善の交通量配分

7-2-1 で述べたような自由な経路選択による均衡では非効率な交通量配分をもたらすことがわかった。一方、7-2-2 で示した最適な交通量配分を実現することもきわめて困難である。そこで現実的な方策として、現在でもすでに料金徴収の行われている有料道路料金を操作することを考える。これによって、最適とはいかないまでも次善の交通量配分を達成することをめざす。一部の道路でのみ料金徴収が可能な状況のもとでの次善の問題に関する理論的分析は、Verhoef, Nijkamp, Rietveld (1996)、Small and Yan (2001)らによって行われているが、それらは2本の道路間の配分を対象としている。本モデルでは、経路が3本以上ある一般的な状況を考慮している。

次善の問題では、有料道路以外の道路において等時間（費用）原則による利用者均衡が達成されている点を考慮する必要がある。

次善最適な交通量配分を求める問題は次のように定式化される。

$$\begin{aligned} \min_{q_i, C^{**}} \quad & \sum_{i=1}^I c_i(q_i) q_i \\ \text{subject to} \quad & q_i(c_i(q_i) - C^{**}) = 0 \quad i = 2, 3, \dots, I \end{aligned} \quad (7-7)$$

$$c_i(q_i) \geq C^{**} \quad i = 2, 3, \dots, I \quad (7-8)$$

and (7-2), (7-5)。

ここに  $C^{**}$  は有料道路以外の道路における利用者均衡時の走行費用である。すな

わちこの問題は、7-2-2における最善の場合の問題に、有料道路以外の道路網における利用者均衡（等時間）の条件(7-7),(7-8)を制約として付加したものである。このような制約が付加されるため最善の交通量配分よりもいくらか劣った解しか得られないという意味で「次善」なのである。

最適化の一階の条件は

$$c_1(q_1) + c'_1(q_1)q_1 - \lambda + \eta_1 = 0 \quad (7-9)$$

$$c_i(q_i) + c'_i(q_i)q_i - \lambda + \rho_i \{c_i(q_i) - C^{**} + c'_i(q_i)q_i\} + \mu_i c'_i(q_i) + \eta_i = 0 \quad i = 2, 3, \dots, I \quad (7-10)$$

$$\sum_{i=2}^I (\mu_i + \rho_i q_i) = 0 \quad i = 1, 2, \dots, I \quad (7-11)$$

ここに  $\lambda, \rho_i, \mu_i, \eta_i$  は、それぞれ制約条件式(7-2), (7-7), (7-8), (7-5)に関するLagrange乗数である。これらの式を整理することにより、次が導かれる。

$$\text{if } q_1 > 0,$$

$$c_1(q_1) + c'_1(q_1)q_1 - \sum_{i=2}^I r_i c'_i(q_i)q_i = C^{**} \quad (7-12a)$$

$$\text{if } q_1 = 0,$$

$$c_1(q_1) + c'_1(q_1)q_1 - \sum_{i=2}^I r_i c'_i(q_i)q_i > C^{**} \quad (7-12b)$$

$$\text{if } q_i > 0, \quad c_i(q_i) = C^{**} \quad i = 2, 3, \dots, I \quad (7-13a)$$

$$\text{if } q_i = 0, \quad c_i(q_i) > C^{**} \quad i = 2, 3, \dots, I \quad (7-13b)$$

ここに

$$r_i = \frac{1/c'_i(q_i)}{\sum_{k=2}^I 1/c'_k(q_k)} \quad (7-14)$$

式(7-12)の左辺第2項は有料道路における一台の追加的利用によって生じる混雑の外部効果であり、第3項は他のすべての道路に関する外部効果の重み付き平均である。重みは(7-14)式により計算される  $r_i$  である。第3項は、一台の車が有料道路を利用することによって一般道路の混雑が緩和される効果と解釈できる。

次善の交通量配分を分権的に達成するための料金を導こう。有料道路で  $\tau_1$  に

等しい料金が課されているときに利用者均衡が達成されるためには、上の計画問題の制約条件として含まれていた式(7-2),(7-5),(7-7),(7-8)とともに、次の条件が成り立つ必要がある。

$$q_1(c_1(q_1) + \tau_1 - C^{**}) = 0 \quad (7-15a)$$

$$c_1(q_1) + \tau_1 \geq C^{**} \quad (7-15b)$$

(7-12)を(7-15)に対応させることにより、次善の料金は次の式によって求められる。

$$\tau_1^{**} = c'_1(q_1)q_1 - \sum_{i=2}^I r_i c'_i(q_i)q_i \quad (7-16)$$

上の式より、有料道路における次善最適料金は混雑の外部効果よりも低く設定されることがわかる。なお、利用可能な経路が2本のみである場合、最善と次善の交通量配分は一致する。

上で示した次善の最適化問題では、料金が計画変数として含まれておらず、また有料道路と他の道路との間の利用者均衡のメカニズムも組み込まれていないが、最適条件を利用者均衡の条件に対応させて解釈することによって(7-16)式のような料金システムを導いたのである。有料道路料金を含んだ利用者均衡を明示的に組み込んだ形で、次善の問題を定式化しても同様の解を得ることができる。以下ではこのことを示すとともに、別の観点から資源配分の状況进行分析することにする。

料金を含めた利用者均衡の条件は、式(7-2)(7-5)(7-7)(7-8)(7-15)から成る方程式体系である。この方程式の解は $\tau_1$ に依存するので、 $q_i(\tau_1)$ と書ける。次善の有料道路料金は次の総トリップ費用最小化問題の最適解 $\tau_1$ である。

$$\text{Min}_{\tau_1} \sum_{i=1}^I c_i(q_i(\tau_1))q_i(\tau_1) \quad (7-17)$$

最適条件を変形することにより、次が得られる。

$$(c'_1 q_1 - \tau_1) \frac{dq_1}{d\tau_1} + \sum_{i=2}^I c'_i q_i \frac{dq_i}{d\tau_1} = 0 \quad (7-18)$$

左辺第1項は有料道路における交通量変化を通じた死重損失の変化、第2項は他の道路における死重損失の変化分である。(7-2)(7-7)(7-8)(7-15)の体系を全微分し、整理することにより、次が得られる。

$$\frac{dq_1}{d\tau_1} = -\frac{1}{c_1'} \frac{\sum_{k=2}^I \frac{1}{c_k'}}{\sum_{k=1}^I \frac{1}{c_k'}} < 0, \quad (7-19a)$$

$$\frac{dq_i}{d\tau_1} = \frac{1}{c_1'} \frac{1}{c_i'} \frac{1}{\sum_{k=1}^I \frac{1}{c_k'}} > 0 \quad (i=2,3,\dots,I) \quad (7-19b)$$

上の結果を式(7-18)に適用して、 $\tau_1$ について解けば、確かに(7-16)と同じ式が得られる。

また、式(7-16)より  $(c_1' q_1 - \tau_1)$  が正になることと、式(7-19)の結果を考慮すると、式(7-18)の左辺第1項が正で第2項が負になることがわかる。すなわち有料道路における料金上昇は、そこでの死重損失を減少させるが他の道路における死重損失を増加させるのである。次善最適料金はこれらの二つの効果が相殺されるように決定される。

#### 7-2-4 有料道路における限界費用料金の賦課

もう一つの有料道路料金の考え方は、有料道路においてのみ混雑の外部効果に等しい料金を徴収することである。このような方法は経路選択を考慮しない部分均衡的な分析、たとえば坂下・林山(1993)による研究において想定されているものである。そこでは混雑料金を導入した場合の有料道路における混雑緩和便益の計測を試みているが、有料道路の利用を断念した車両が一般道路に転換することによってそこでの混雑を悪化させる効果は考慮されていない。したがって有料道路のみの効率性を追及して限界費用料金を徴収することは社会全体としては最適な政策とはいえない。しかしこのような政策が検討対象として取り上げられることは多いと思われるので、その帰結がいかなるものかを知るため、代替的政策の一つとして考慮する。

有料道路において限界費用料金を徴収される場合の交通量配分は、次の条件式

$$\text{if } q_1 > 0, \quad c_1(q_1) + c_1'(q_1)q_1 = C^m \quad (7-17a)$$



$$\text{if } q_1 = 0, \quad c_1(q_1) + c'_1(q_1)q_1 > C^m \quad (7-17b)$$

$$\text{if } q_i > 0, \quad c_i(q_i) = C^m \quad i = 2, 3, \dots, I \quad (7-18a)$$

$$\text{if } q_i = 0, \quad c_i(q_i) > C^m \quad i = 2, 3, \dots, I \quad (7-18b)$$

及び(7-2)によって求められる。ここに  $C^m$  は均衡時に利用されるすべての経路で等しくなる一般化費用である。(7-17)式の左辺第2項が有料道路において徴収される混雑費用である。

### 7-3 交通量配分方式の比較

1本の有料道路と、2本の一般道路から成る道路網を考える。これらの道路条件は表7-1の通りである。

表 7-1 道路条件

道 路	長さ(km)	容量(台/時)
1 (有料道路)	8.0	2500
2	10.0	1800
3	15.0	1800

また諸パラメータの値を以下のように設定する。

総交通量  $N = 4000$  (台/時)

時間評価値  $\alpha = 2000$  (円)

自由走行速度  $v_f = 60$  (km/h)

また各道路の通過所要時間は次の式によって計算される。

$$t_i(q_i) = t_i^0 \left\{ 1.0 + 2.62 \left( \frac{q_i}{W_i} \right)^{5.0} \right\} \quad (7-19)$$

ここに  $t_i^0$  は自由走行時の所要時間であり、これは(道路長/自由走行速度)によって計算される。また  $W_i$  は道路  $i$  の容量である。

計算結果を表7-2に示す。

まず表7-2(a)に示した交通量配分結果について見ると、混雑料金の導入によって有料道路の交通量が減少することがわかる。その分だけ一般道路へ配分さ

れる交通量が増加している。また最適と次善の場合の有料道路交通量の差はわずかであるが、次善の場合の方が有料道路の交通量が少ない。

表 7-2(b)より、無料金均衡以外の配分方式では、(走行費用+料金)として定義される一般化費用に関して均衡が達成されていることが確かめられる。なお最適の場合の混雑料金は、料金差のみが交通量配分に意味を持つので、最低料金との差を示している。

表 7-2(c)における総走行費用とは、(7-4)式で表わされる目的関数の値であり、時間費用の合計に等しい。一方、走行費用+料金とは、これに総料金収入(支出)を加えたものであり、実際に利用者が負担する額の合計である。総走行費用は、最適の場合、均衡の場合と比べ、約 10%減少させることができる。しかし一方で、実際に利用者が負担する総費用(=走行費用+混雑料金)は約 14%増加する。混雑料金を課すると社会的な効率性は改善されるが、それ以上に利用者の負担が増えるのである。さらにこのような効率性の改善は、上で見たように交通量を有料道路から一般道路に転換させることによって達成される点にも注目されたい。

表 7-2 配分方式の比較

(a) 経路別交通量

道路	長さ	容量	均衡	最適	次善	有料道路のみ限界費用料金
1	8.	2500.	2023.	1767.	1740.	1506.
2	10.	1800.	1307.	1194.	1353.	1419.
3	15.	1800.	670.	1040.	908.	1075.

(単位：台／時)

(b) 経路ごとの走行費用と通行料金

道路	均衡	最 適		次 善		有料道路で限界費用	
	走行費用	走行費用	料金	走行費用	料金	走行費用	料金
1	509.35	389.78	194.45	380.64	162.07	322.12	277.26
2	509.35	445.34	138.90	542.70	0.00	599.38	0.00
3	509.35	584.22	0.00	542.71	0.00	599.38	0.00

(単位：円)

(c) 各配分方式の評価

	均衡	最適	次善	有料道路のみ限界 費用料金
総走行費用	2037408.12	1827600.62	1888893.12	1979931.25
走行費用＋料金	—	2336925.25	2170821.00	2397531.50

(単位：円)

次善の場合、総走行費用の低減効果は最適の場合に及ばないが、約 7%に達している。また利用者の負担は最適の場合よりも低いので、その点で利用者の不満はいくらか軽減されるものと考えられる。

有料道路のみ限界費用料金を課した場合、総走行費用は無料金均衡の場合よりも低減されるが、次善の場合には及ばない。さらにこの場合、利用者の負担する総費用（＝走行費用＋料金）は最も大きい。したがって有料道路のみで限界費用料金を徴収することは効率性の観点からも、また利用者の立場からも支持は得られそうにない。

なお、ここでの状況設定は、有料道路が最短距離の経路となっているが、そうでない場合、次善の有料道路料金はマイナスになることもありうる。

ここで得られた結果は先に設定された特定のパラメータや道路条件のものであるが、このような条件を様々に変更した場合についても分析を行った。その結果、条件が変わっても定性的な結果には影響しないことが確かめられた。

#### 7-4 ドライバーの異質性を考慮したモデル

これまではすべてのドライバーが均質であり、同一の時間価値を持つものと仮定された。しかし負傷したときなど緊急の用がある場合や、時間あたり賃金の高い人などは旅行時間に対する評価値が高くなると考えられる。このような場合、交通量配分や混雑料金はどのように変化するかを調べることにする。

ただし自動車の性能や一台の流入による混雑効果はドライバーのタイプに関わりなくすべて同一であると仮定する。その他の設定は上の分析と同様である。

上の分析と同様、均衡、最適、次善の順に各方式の定式化を行うこととする。

#### 7-4-1 無料金均衡

各ドライバーの自由な経路選択の結果達成される均衡の条件は次の通り

$$\text{if } q_{ij} > 0, \quad c_{ij}(Q_i) = C_j^*, \quad j=1,2,\dots,J \quad i=1,2,\dots,I \quad (7-20a)$$

$$\text{if } q_{ij} = 0, \quad c_{ij}(Q_i) > C_j^*, \quad j=1,2,\dots,J \quad i=1,2,\dots,I \quad (7-20b)$$

$$\sum_{j=1}^J q_{ij} = Q_i \quad i=1,2,\dots,I \quad (7-21)$$

$$\sum_{i=1}^I q_{ij} = N_j \quad j=1,2,\dots,J \quad (7-22)$$

ここに  $q_{ij}$  は道路  $i$  を利用する  $j$  タイプのドライバーの数、 $Q_i$  は道路  $i$  を利用する総交通量、そして  $N_j$  はタイプ  $j$  の道路利用者の総数である。また  $c_{ij}(Q_i)$  はタイプ  $j$  のドライバーにとっての、道路  $i$  の走行費用であり、

$$c_{ij}(Q_i) = \alpha_j t_i(Q_i) \quad (7-23)$$

により定義される。ここに  $\alpha_j$  はタイプ  $j$  のドライバーの時間評価値である。また(7-20)式右辺の  $C_j^*$  は均衡時にタイプ  $j$  のドライバー間で等しくなる走行費用である。

#### 7-4-2 最適な交通量配分

複数タイプのドライバーが存在する場合の最適な交通量配分は次の問題を解くことによって得られる。

$$\text{Min}_{q_{ij}} \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J c_{ij}(Q_i) q_{ij} \quad (7-24)$$

Subject to (7-21)(7-22)and

$$q_{ij} \geq 0 \quad (7-25)$$

最適条件は

$$\text{if } q_{ij} > 0, \quad c_{ij}(Q_i) + \sum_{j=1}^J c'_{ij}(Q_i) q_{ij} = C_j^o, \quad (7-26a)$$

$$\text{if } q_{ij} = 0, \quad c_{ij}(Q_i) + \sum_{j=1}^J c'_{ij}(Q_i) q_{ij} > C_j^o, \quad (7-26b)$$

および(7-21)(7-22)である。ここで左辺の第2項に等しい額の料金をすべての道路で徴収することにより、最適な交通量配分を分権的に達成される。

### 7-4-3 有料道路料金による次善の交通量配分

有料道路の通行に対してのみ料金を徴収できる場合の次善の交通量配分は次の問題を解くことによって得られる。

$$\text{Min}_{q_{ij}, C_j^*} \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J c_{ij}(Q_i) q_{ij}$$

$$\text{subject to } q_{ij}(c_{ij}(Q_i) - C_j^{**}) = 0 \quad i = 2, 3, \dots, I \quad (7-27)$$

$$c_{ij}(Q_i) \geq C_j^{**}, \quad i = 2, 3, \dots, I \quad (7-28)$$

最適条件は

$$c_{1j}(Q_1) + \sum_{j=1}^J c'_{1j}(Q_1) q_{1j} - \lambda_j + \eta_{1j} = 0 \quad (7-29)$$

$$c_{ij}(q_i) + \sum_{j=1}^J c'_{ij}(Q_i) q_{ij} + \rho_{ij} \{c_{ij}(Q_i) - C_j^{**}\} + \sum_{j=1}^J \rho_{ij} c'_{ij}(Q_i) q_{ij} + \sum_{j=1}^J \mu_{ij} c'_{ij}(Q_i) - \lambda_j + \eta_{ij} = 0$$

$$i = 2, 3, \dots, I \quad (7-30)$$

$$\sum_{i=2}^I (\mu_{ij} + \rho_{ij} q_{ij}) = 0 \quad (7-31)$$

ここに  $\lambda_i, \rho_{ij}, \mu_{ij}, \eta_{ij}$  は、それぞれ制約条件式(7-22), (7-27), (7-28), (7-25)に関するLagrange 乗数である。これらを整理することにより次が得られる。

$$\text{if } q_{1j} > 0, \quad c_{1j}(Q_1) + \sum_{j=1}^J c'_{1j}(Q_1) q_{1j} - \sum_{i=2}^I r_i \sum_{j=1}^J c'_{ij}(Q_i) q_{ij} = C_j^{**} \quad (7-32a)$$

$$\text{if } q_{1j} = 0, \quad c_{1j}(Q_1) + \sum_{j=1}^J c'_{1j}(Q_1) q_{1j} - \sum_{i=2}^I r_i \sum_{j=1}^J c'_{ij}(Q_i) q_{ij} > C_j^{**} \quad (7-32b)$$

$$\text{if } q_{1j} > 0, \quad c_{ij}(Q_i) = C_j^{**} \quad i = 2, 3, \dots, I \quad (7-33a)$$

$$\text{if } q_{1j} = 0, \quad c_{ij}(Q_i) > C_j^{**} \quad i = 2, 3, \dots, I \quad (7-33b)$$

ここに

$$r_i = \frac{1/t'_i(Q_i)}{\sum_{k=2}^I 1/t'_k(Q_k)} \quad (7-34)$$

7-2-3 と同様、(7-32)式左辺の第 2 項と 3 項の差に等しい額の料金を、有料道路で徴収することにより次善の交通量配分が達成される。(7-32)式より、そのような料金がドライバーのタイプに依存しない点に注目されたい。したがって交通管理者が料金を徴収する際に個々のドライバーの時間評価値を知る必要はない。これは料金政策の実行可能性という観点からは、好ましい性質といえる。

## 7-5 ドライバーの異質性と料金政策の効果

最も単純なケースとして 2 種類の時間価値を持つドライバーが存在する状況を想定する。道路の条件などは 7-3 と同様とし、各タイプの総交通量と時間評価値を次のように設定する。

$$N_1 = N_2 = 2000$$

$$\alpha_1 = 2500, \alpha_2 = 1500$$

ここで時間評価値の平均は、7-3 におけるものと等しくなるようにした。これは同質なドライバーを仮定した場合との比較を可能とするためである。

### 7-5-1 交通量配分方式の比較

数値計算の結果を表 7-3 に示す。均衡の場合、各道路におけるタイプ別構成は一意には決まらないので、表には均等に混在する場合を示している。

表 7-3 2 タイプのドライバーが存在する場合の数値計算結果

#### (a) 経路別交通量

タイプ	道路	長さ	容量	均衡	最適	次善
1	1	8.	2500.	1012.	1697.	1691.
	2	10.	1800.	653.	303.	308.
	3	15.	1800.	335.	0.	0.
2	1	8.	2500.	1012.	0.	0.
	2	10.	1800.	653.	906.	1056.
	3	15.	1800.	335.	1093.	944.

(単位：台／時)

## (b) 経路ごとの走行費用と通行料金

		均 衡	最 適		次 善	
タイプ	道路	走行費用	走行費用	料金	走行費用	料金
1	1	636.66	459.23	223.24	457.11	232.75
	2	636.70	566.01	116.56	689.89	0.00
	3	636.70	760.41	0.00	689.92	0.00
2	1	382.00	275.54	223.24	274.26	232.75
	2	382.02	339.61	116.56	413.93	0.00
	3	382.02	456.25	0.00	413.95	0.00

(単位：台／時)

## (c) 各配分方式の評価

	タイプ	均 衡	最 適	次 善
総走行費用	All	2037374.62	1757393.75	1813758.62
	1	1273359.12	950706.25	985945.81
	2	764015.56	806687.50	827812.87
走行費用＋料金	All		2277197.25	2207414.25
	1	—	1364852.00	1379601.25
	2		912333.94	827812.87

(単位：円)

ただし、各道路の交通量  $Q_i$  は一意である。最適および次善の場合、有料道路はタイプ 1（時間評価値の高い）のドライバーによって占められ、最も距離の長い道路 3 がタイプ 2 のドライバーによって占められる。すなわちタイプ別の分離がなされる。なお、最適の場合のタイプ別構成比は、均衡の場合とは異なり一意に決まるが、次善の場合、有料道路におけるタイプ別構成比のみが一意である。

総走行費用は、何等の対策を講じない均衡の場合と比べ、最適の場合で約 13%、次善の場合でも約 11% 低下する。これは、同質のドライバーを仮定した 7-3 における結果と比べても、大きな改善であるといえる。しかしこれをさらにタイプ別に見ると、タイプ 1 の総走行時間が混雑料金の賦課によって大きく減少しているのに対し、タイプ 2 のそれは逆に増加している。混雑料金の賦課は、時間評価値の低いグループをより不利にする。実際にドライバーの負担する費用は走行費用に料金を加えたものであるが、これを見ると、いずれのタイプも混雑料金の賦課によって実質的な負担は増加している。特に最適の場合、タイプ

1 よりもタイプ 2 の負担増が相対的にもまた絶対値としても大きい。次善の場合では、負担の増加率は各タイプでほぼ等しくなり、タイプ 2 にとっての相対的不便さの程度は軽減される。

多くの場合、時間評価値は所得に比例すると考えられているが、それに従うと、混雑料金の賦課は、低所得層により大きな負担を求める逆進的な政策ということになる。しかし、第 1 章でも議論したように、低所得層にとっても急ぐ用事のある場合もあり、その際の時間評価値は高所得層のそれよりも高くなる可能性もある。

#### 7-5-2 交通制御による効果との比較

一部の都市高速道路では、交通制御として高速道路入り口のゲートの一部を閉鎖して流入を制限することが実際に行われている。その際、高速道路へ流入する車のドライバーを選別することができないので、時間価値の高い者も低い者も同時に流入することになる。一方で、高速道路への流入を制限された車のドライバーたちの中にも時間価値の高い者と低い者が混在する。交通制御によって可能なことは台数の制御に限定される。

いま流入制御を行うことによって、表 7-3 に示した次善の場合と等しい経路別交通量配分が達成されたと想定しよう。ただし次善の場合と等しくなるのはタイプについて合計した交通量  $Q_i$  のみであり、タイプ別交通量  $q_{ij}$  は異なる。流入制御を行う場合の各経路におけるタイプ別構成は不定であるが、期待値としては均等に混ざっている状態を考えることができる。その場合の総走行費用を計算すると 1,892,507 円であった。一方、料金政策によって次善の交通量配分が達成されたときには、有料道路がタイプ 1 のドライバーのみによって利用され、そのときの総走行費用は、表 7-3 によると 1,813,758 円であった。比較すると流入制御の場合よりも約 4.4% 減少している。これは有料道路に流入することのできた時間価値の低い車と一般道路の利用を余儀なくされた時間価値の高い車を入れ換えることによって総走行費用の低減が達成されたのである。入れ替えによってさらなる改善がされなくなった状態が表 7-3 に示したタイプ別に分離される交通量配分である。混雑料金を有料道路の入り口で徴収するようになれば、入れ替えを行わなくとも、各ドライバーの自発的な選択行動によって同



様の結果を得られるのである。ドライバーにとっても、急ぐときに流入制御によって有料道路の利用を排除されるより、高い費用を払っても早く着く可能性を確保される方が望ましいという考え方もあり得るだろう。流入制御はそのような場合に、時間評価値の高い利用者を排除することによって非効率な結果を招く可能性がある。

## 7-6 おわりに

本章では道路料金がドライバーの経路選択に及ぼす効果に着目して、次善の料金政策による混雑軽減効果について分析した。

ここで得られた結果を以下に要約する。

(1)有料道路料金による次善の交通量配分を達成するためには、有料道路における混雑外部効果から、一般道路における混雑外部効果の重み付き平均値を控除した額に等しい料金を徴収すればよい。

(2)ドライバー間で時間価値が異なる場合、次善の有料道路料金はタイプ間で差別する必要はない。また次善の料金による効率性の改善は、同質のドライバーを仮定した場合よりも大きい。これは時間価値の高い者が有料道路を利用して時間費用を節約し、時間価値の低い者は一般道路を利用して金銭的負担を避けるという形で、道路別に利用者のタイプが異なる状況が実現するためである。

(3)流入制御などの工学的手段は、料金のように各道路の利用者タイプを選別する機能を持たないため、効率性の面で劣る。

本章で提案したシステムにおける交通管理者の役割は、各ドライバーに所要時間などの正確な情報と、そのときの最適料金を伝えることによって、ドライバー自らの選択によって望ましい交通量配分の達成を図ることである。このようなシステムは、情報技術の進歩によって夢物語ではなくなりつつあるが、情報技術がいかに進歩しても、完全な情報を与えることは不可能である。したがってドライバーの側でも与えられた情報の不確実性を考慮しながら経路の選択を行うだろう。一方の交通管理者もそのようなドライバーの反応を勘案しながら料金を設定する必要がある。第8章では、不確実性のもとでの経路選択行

動を定式化し、情報提供と混雑料金の組み合わせに関する分析を行っている。

また本章の分析は、1組のODペアのみを対象としており、道路網の形状も最も単純なものであった。第9章では、より一般的なネットワークにおいて複数ODを考慮した分析を行っている。

## 第8章 交通情報システムと混雑料金\*

### 8-1 はじめに

本書の他の章では、道路利用者がトリップ経路における交通状況について完全な情報を持っており、それにもとづいて合理的な選択を行うものと仮定されていた。そこで導かれた混雑料金も、上のような想定が成り立つ場合にのみ、予想された成果を達成することができる。ところが実際のところ、目的地へ行くためにいくつかの経路が存在する場合、それぞれの経路の交通状況は日によって、あるいは時刻によって変動することが通常である。このとき各利用者は、各経路の所要時間に関する不確実性を考慮しながら経路選択を行う。利用者の選択の結果として道路ごとの交通量が決まり、それが混雑水準に反映されることから、所要時間の不確実性が内生的に決定されることにも注意されたい。

情報技術のめざましい進歩は、交通情報システムの精度向上と費用の低下をもたらし、現在、様々な方式で広範に交通情報が提供されている。交通情報が提供されると、旅行時間の不確実性が減少する。このとき個々の利用者は混雑する経路を避けて旅行時間を短縮することができ、社会全体としても混雑による損失を減少させることが期待される<sup>1</sup>。インフラストラクチャとして整備が進められている「高度道路情報システム（Intelligent Transport Systems, ITS）」が50兆円の市場を創造すると試算されているが、その金額の妥当性はともかくとして、交通情報に大きな価値があることに異論はないだろう。交通情報の価値を推定するためには、不確実性のもとでの交通行動を記述するモデルが必要である。そして交通情報を通じて不確実性が減少したときに交通状況がどのように変化するかを分析することによって、交通情報システムの経済効果を評価することができる。

---

\* 本章は文(1995)および文・小林・安野(1997)に基づいている。

<sup>1</sup> 不確実性の減少は、個人が予定の時刻に目的地へ着けないリスクを考慮して必要以上に早く出発するという行動を不要にする効果もある。

情報技術の進歩は混雑料金の実現可能性を大きく高めたことにも注目すべきである。自動料金収受システム(ETC)はITSの主要プロジェクトの一つであり、高速道路での普及が進んでいる。現時点においては、料金所における停車を不要にすることで渋滞を解消する役割が重視されているが、普及が進めば、混雑状況に応じて料金を変動させるようなシステムに用いることが可能である。すでに、個々の車両を認識し、いかに料金を徴収するかというハードな技術的基盤は整備されつつあるが、どの道路でいくらの料金を課すべきかというソフトな問題に関する研究は十分に行われているとはいえない。

本章では、混雑料金により不確実性下の利用者の経路選択を誘導する問題を分析する。その際、交通管理者が道路料金を交通状況に応じて設定し、それを事前に情報システムを通じて利用者に通知されたと考える。この場合、道路料金は利用者の経路選択を誘導する直接的なインセンティブを与えると同時に交通状況の生起状態を利用者に通知する交通情報としての機能を果たす。

ここでは、まず交通情報がない場合とある場合について利用者均衡配分を求め、それらを比較することにより交通情報システム単体の経済効果を評価する。次に、交通情報がない場合とある場合について最適交通量配分と混雑料金を求め、それらの比較により交通情報と混雑料金の組み合わせが交通量配分の効率化に及ぼす効果を評価する。

## 8-2 従来の研究

ネットワーク均衡に関する研究の多くは完全情報を有する利用者の経路選択を前提としていた。それに対してDaganzo and Sheffi (1977)、Fisk (1980)らは、利用者が認識する旅行時間が確率的に分布することを仮定した確率的利用者均衡モデルを開発した。また赤松・桑原(1988)は確率的利用者均衡モデルにもとづいて混雑料金を計算する方法について検討している。しかし確率的利用者均衡モデルは、不確実性に対する利用者の反応行動を定式化したものではないので、情報提供の効果を経済理論と整合のとれた形で分析することは困難である。

飯田・内田(1993)は、旅行費用の不確実性を考慮した経路選択行動を分析し

た。しかし情報提供を受けた利用者の選択行動が交通量配分に影響を及ぼし、それが旅行費用の確率分布を変化させる効果を見逃している。情報提供の効果を分析するためには、上述したように利用者行動の結果である不確実性を内生化したモデルが不可欠である。

Arnott等(1991)は、不確実性下の意思決定に関する経済理論に基づいて、交通情報の提供が交通混雑の緩和をもたらすかを分析した。この研究では、完全に正確な情報を提供するようなシステムのもとでは、情報のない場合に比べて必ず経済厚生が改善することが示された。しかし提供する情報が不完全な場合、経済厚生がむしろ悪化する場合があることも示された。本研究では、完全な情報のもとでも経済厚生を悪化させる場合があることが後に示される。このような結果の相違は、混雑を記述するモデルの違いによるものといえる<sup>2</sup>。

Kanafani等(1991)は経路誘導によって総費用最小化配分を達成した場合と利用者均衡の場合の差額に基づいて経路誘導の便益を測定する方法を提案した。しかし、総費用最小化配分をいかに達成するかに関しては不問に付した。管理者が総費用最小化配分をめざして利用者に選択経路を指示した場合、一部の利用者はより長時間の走行を強いられる。このことはいずれ利用者の知るところになり、管理者の指示に従わない利用者が現われるだろう。総費用最小化配分を分権的に達成するためには利用者の誘因と整合的であるような手段を導入する必要がある。本研究ではそのための手段として混雑料金に着目する。

### 8-3 モデル

#### 8-3-1 設定

空間的に離れた2つの地点の間に $I$ 本の代替的な経路が存在する場合を考える。2地点間の交通需要は $N$ でありその値は固定されている。各利用者は、上記の $I$ 本の道路のいずれかを通して目的地へ向かう。本研究では、道路ネットワークで生じる不確実性を、 $K$ 個の離散的な事象の生起により表現し、それぞれの事象に対応して各経路の走行時間関数が変化すると考える。各事象の生起

---

<sup>2</sup> Arnottらは第3章の3-2で紹介したボトルネックモデルを用いている。

確率は外生的に与えられるが、それぞれの事象に対応する状態変数（すなわち混雑水準）は内生的に決定される。

### 3-3-2 不確実性下でのネットワーク均衡

利用者にとっては、どのような事象が生起するかが判らない不確実な環境で経路選択する場合を考える。このとき各利用者は事象にかかわらず同一の経路を選択する。換言すれば、事象全体を通じてある1つの交通量配分が実現している。k番目の事象が生じる確率を $\pi_k (k=1,2,\dots,K)$ と表す。事象kが生じた場合のトリップ費用 $c_i^k(q_i)$ を次式のように定式化する。

$$c_i^k(q_i) = \tau_i^k + \alpha \cdot t_i^k(q_i) \quad (8-1)$$

ここに $\tau_i^k$ は道路料金、 $t_i^k(q_i)$ は走行時間、 $\alpha$ は時間価値、そして $q_i$ は経路iの交通量である。走行時間は、交通量に関する増加凸関数であると仮定する。

利用者は期待効用が最大となる経路を選択する。利用者は事象の生起について正確な情報を持たないが、経験を通じて各事象の生じる確率分布、及び各事象が生じた場合に実現する経路走行費用を知っていると仮定する。経路iに対する期待効用 $EU_i$ を

$$EU_i = E[U(c_i^k(q_i))] = \sum_k \pi_k \cdot U(c_i^k(q_i)) \quad (8-2)$$

と表わす。ここで $U(c_i^k(q_i))$ は $c_i^k(q_i)$ に依存する効用であり、次のような性質を持つ。

$$U'(c_i^k(q_i)) < 0, \quad U''(c_i^k(q_i)) \leq 0 \quad (8-3)$$

なお、 $U''(c_i^k(q_i)) \leq 0$ は、利用者が危険回避的（等号の場合は危険中立的）であることを意味する。危険中立的の場合、利用者の行動は期待費用最小化と等価である。すべての利用者が同質であると仮定すると、ネットワーク均衡は

$$EU_i = U^* \quad \text{if } q_i^* > 0 \quad (8-4a)$$

$$EU_i \leq U^* \quad \text{if } q_i^* = 0 \quad (8-4b)$$

$$\sum_i q_i^* = N \quad (8-4c)$$

を満たす道路別交通量 $q_i^*$ である。上述のように利用者は事前にどの事象が起きているか知らず、事象に応じて経路を変更することができないので、均衡交

通量  $q_i^*$  は事象  $k$  に依存しないことに注意されたい。  $U^*$  は均衡における期待効用水準であり、内生的に決定される。上の式は、利用者がどの経路を選んでも同一の期待効用水準を達成することを表している。このとき各利用者は経路を変更する誘因を持たないので均衡が達成される。

社会厚生水準を期待効用の単位で評価すると、それは次のように書ける。

$$V^* = N \cdot U^* \quad (8-5)$$

### 8-3-3 完全な情報を提供した場合の均衡

本研究では、完全な情報がすべての利用者に与えられる場合について検討する。このような状況は非現実的であるが、情報システムに関する技術開発の究極の目標が達成された状況であると考えれば、このときに達成される厚生水準を一つの参照点として求めておくことは有益である。

完全な情報が提供された場合、各利用者はトリップを行う前にどの事象が起きるかを知ることができるので、それに合わせて自らの効用を最大化すべく経路を選択する。いま事象  $k$  が起き、交通管理者がそのことを利用者にメッセージとして通知する場合、均衡において次の関係式が成立する。

$$U(c_i^k(q_i^k)) = U_k^{**}, \quad \text{if } q_i^k > 0 \quad (8-6a)$$

$$U(c_i^k(q_i^k)) \leq U_k^{**}, \quad \text{if } q_i^k = 0 \quad (8-6b)$$

$$\sum_i q_i^k = N \quad (8-6c)$$

上の式において、効用は交通費用のみの関数なので、これは等費用原則による交通量配分と同様である。このとき各利用者は、状況に応じて利用する経路を選択するので、均衡交通量は事象  $k$  に依存するものとして  $q_i^k$  のように表される。完全な情報システムのもとでの総厚生水準は次の式によって計算される。

$$V^{**} = N \sum_k \pi_k \cdot U_k^{**} \quad (8-7)$$

## 8-4 最適な交通量配分と混雑料金

### 8-4-1 情報と料金システム

料金システムとして固定料金と変動料金の2種類を考える。固定料金制とは

そのときどきの状況に関わらず、各経路ごとに設定されたある一定の料金を利用者から徴収する方式である。一方、変動料金制とはそのつどの事象の生起状態に対応して異なる額の料金を徴収する方式である。混雑料金の価格情報としての役割を考える場合、徴収する料金を経路選択の前に利用者に通知するのか、事後に通知するのかが決定的に重要となる。利用者が経路選択を行う以前に徴収する料金を通知する場合、料金自体が事象の生起状態に関する情報の役割を果たすことになる。この意味において、固定料金のみでの提示は交通情報としての役割を果たさないが、変動料金は利用者に事前に告知されることにより交通情報としての機能を果たす。本研究では料金が経路選択の事前に告知されることを前提として以下議論を進める。

#### 8-4-2 不確実性下での最適交通配分と料金

最適な交通量配分とは、 $N$ 人の利用者の期待効用の総和を最大化することによって達成される。解くべき問題は

$$\text{Max}_{q_i} \sum_i q_i EU_i \quad (8-8a)$$

$$\sum_i q_i = N \quad (8-8b)$$

$$q_i \geq 0 \quad (8-8c)$$

この問題の最適条件を求めると、次のようになる。

$$\begin{aligned} EU_i + E[U'c']q_i &= U^0, \quad \text{if } q_i > 0 \\ EU_i + E[U'c']q_i &\leq U^0, \quad \text{if } q_i = 0 \end{aligned} \quad (8-9)$$

および(8-8b)。

ここに  $E[U'c'] = \sum_k \pi_k \frac{dU}{dc_i^k} \frac{dc_i^k}{dq_i}$  であり、 $U^0$  は制約条件(8-8b)に関するラグランジュ

乗数である。(8-9)式の左辺第2項は、道路 $i$ の交通量が一台増加した場合にその道路を利用するすべての利用者の期待効用水準に及ぼす外部効果である。最適な交通量配分を分権的に達成するためには、このような外部効果に応じた料金を各道路で徴収すればよい。上の式は、効用単位で定義されているので、金銭単位で料金を求めるためには、次の式を満たすように $\tau_i$ を求めればよい。



$$EU_i + E[U'c']q_i^o = E[U(c_i^k + \tau_i)] \quad (8-10)$$

ここに  $q_i^o$  は上の最適条件を満たす道路別交通量である。最適な交通量配分のもとで達成される社会全体の厚生は、上の目的関数の最大値であり、次の式により評価される。

$$Y^F = \sum_i q_i^o EU_i(q_i^o) \quad (8-11)$$

さらに、利用者の厚生水準は、道路料金を支払わねばならないので、次のようになる。

$$V^F = N \cdot U^o \quad (8-12)$$

#### 8-4-3 情報提供と変動料金の組み合わせ

交通管理者が日々の交通状況を完全に把握し、その日の交通状況に応じた最適な交通量配分の達成を図る場合を想定する。ある日、 $k$  という事象の起きることがわかった場合、交通管理者の解くべき問題は、

$$\text{Max}_{q_i^k} \sum_i q_i^k U(c_i^k(q_i^k)) \quad (8-13a)$$

$$\sum_i q_i^k = N \quad (8-13b)$$

$$q_i^k > 0 \quad (8-13c)$$

上の問題の最適条件は

$$\begin{aligned} U(c_i^k(q_i^k)) + U' \cdot c_i'^k \cdot q_i^k &= U_k^{oo}, \quad \text{if } q_i^k > 0 \\ U(c_i^k(q_i^k)) + U' \cdot c_i'^k \cdot q_i^k &\leq U_k^{oo}, \quad \text{if } q_i^k = 0 \end{aligned} \quad (8-14)$$

および(8-13b)である。このような交通量配分を分権的に達成するため、交通管理者は、その日の交通状況に対する情報とともに経路別の料金を提示すればよい。そのような料金は、上と同様、次の式を解くことによって求められる。

$$U(c_i^k(q_i^{koo}) + \tau_i^k) = U_k^{oo} \quad (8-15)$$

ここに  $q_i^{koo}$  は上の最適条件を満たす道路別交通量である。このような設定のもとでの社会的厚生は次式で評価される。

$$Y^V = \sum_k \sum_i \pi_k q_i^{koo} U(c_i^k(q_i^{koo})) \quad (8-16)$$

また利用者の厚生水準は次の式により計算される。

$$V^V = N \sum_k \pi_k U_k^{oo} \quad (8-17)$$

## 8-5 情報・料金システムの厚生効果

前節までに示した4通りの交通量配分によって達成される経済厚生水準を比較すると、以下のような関係を得ることができる。これらの内、(a),(b)については、優劣を確定できないことが重要な結論であるが、そのことは次節の数値例によって示される。その他の証明は付論において与えられている。

(a)  $V^{**} \gtrless V^*$ ?

道路に料金が課されない場合、完全情報を提供したとしても、社会的厚生が改善されるとは限らない。すなわち情報を提供することによって社会的厚生が悪化するという逆説的結果が生じる可能性がある。

(b)  $V^{**} \gtrless Y^F$ ?

完全情報の提供のみの場合と、不確実性下の最適交通量配分の場合の社会的厚生との優劣はつけられない。

(c)  $Y^F \geq V^*$

不確実性下でも、混雑料金の導入によって、社会的厚生は改善される。

(d)  $Y^V \geq Y^F$

完全情報の提供と変動料金の組み合わせによる最適交通量配分は、不確実性下の最適交通量配分よりも高い水準の社会的厚生を達成する。

(e)  $Y^V \geq V^{**}$

完全情報下では、混雑料金の導入によって社会的厚生が改善される。

(f)  $V^F < V^*$

不確実性下において、混雑料金の導入は利用者の私的厚生を悪化させる。

(g)  $V^V < V^{**}$

完全情報下において、混雑料金の導入は利用者の私的厚生を悪化させる。

## 8-6 シミュレーション

数値シミュレーションの主たる目的は、前節の命題(a),(b)のように優劣が確定的でない結果を具体的に示すことである。

簡単のために、道路の数は二本であると仮定し、それぞれの道路に関する走行時間関数を次のように特定化する。

$$t_i^k(q_i^k) = t_i^0 \left\{ 1 + d \left( \frac{q_i^k}{W_i^k} \right)^\beta \right\}$$

ここに  $t_i^0$  : 自由走行状態における経路*i*の走行時間

ここでは、不確実性を交通容量の変動によって表現する。各道路における交通容量が日によって大きい場合と小さい場合があると仮定する。

$$W_i^1 = W_i^m + \Delta_i, W_i^2 = W_i^m - \Delta_i$$

ここに  $W_i^1, W_i^2$  は、それぞれ、道路*i*において容量が大きい場合、小さい場合の交通容量である。さらに各事象の生じる確率は等しいと仮定する。

したがって、全体的な事象の数は、以下の4通りである。

事象	道路 1 の容量	道路 2 の容量	生起確率
1	大	大	0.25
2	大	小	0.25
3	小	大	0.25
4	小	小	0.25

効用関数は、下記のように絶対的リスク回避度一定型と仮定する。

$$U(c) = -\exp[-a(r - s \cdot c)]$$

ここに  $a$  : 絶対的リスク回避度、 $r, s$  : パラメータ

数値計算に用いるパラメータは次のように与えられる。

$$a = 0.2, r = 30, s = 1, d = 2.6, \beta = 5,$$

$$\Delta_1 = \Delta_2 = 10, N = 100$$

ここでは、道路条件（道路の長さ、容量）の代表的組み合わせとして、次の4つのケースについて数値計算を行う。

Case 1:  $t_1^0 = 5, t_2^0 = 10, W_1^m = 80, W_2^m = 80$

Case 2:  $t_1^0 = 5, t_2^0 = 10, W_1^m = 60, W_2^m = 100$

Case 3:  $t_1^0 = 5, t_2^0 = 10, W_1^m = 100, W_2^m = 60$

Case 4:  $t_1^0 = 7.5, t_2^0 = 7.5, W_1^m = 100, W_2^m = 60$

図8-1では、Case 3のとき、 $V^{**} < V^*$ となっている。すなわち完全情報を提供した場合のネットワーク均衡は、情報のない場合よりも利用者の厚生が低い。このケースは、2本の道路の内1本の長さが短くかつ容量が大きいという設定であるが、そのような組み合わせは現実にも十分にあり得ることであり、パラメータの数値も極端なものではない。このような結果は、それほど頻繁に起こるわけではないものの、完全情報のもとでも生じる可能性があることに留意されたい。情報を提供することによって社会厚生を低下させる可能性があるということは、情報システムの導入が交通混雑を改善するはずという一般的な期待を裏切るものといえる。しかし第7章で議論したように完全情報下でも利用者均衡が最適な配分と一致しないことを考えれば不思議なことではない。不確実性のある場合、利用者均衡のもとでの交通量配分は、混雑の外部性と情報の不完全性という二つの要因によって非効率となる。これら二つの要因のはたらく方向が反対である場合、交通情報の提供によって均衡配分と最適配分の乖離が拡大する可能性は十分あり得る。効率性を抜本的に改善するためには情報提供だけでは不十分であり、混雑料金のような施策を併用することが必要である。

図では、 $V^F$ と $V^{**}$ の優劣が一概にいけないことも確かめることができる。また、Case 4では、情報なし、完全情報のいずれの場合も、均衡と最適の厚生水準が一致している。すなわち、自由走行時の走行時間（道路の長さ）が等しい道路間では、料金政策の効果はない。

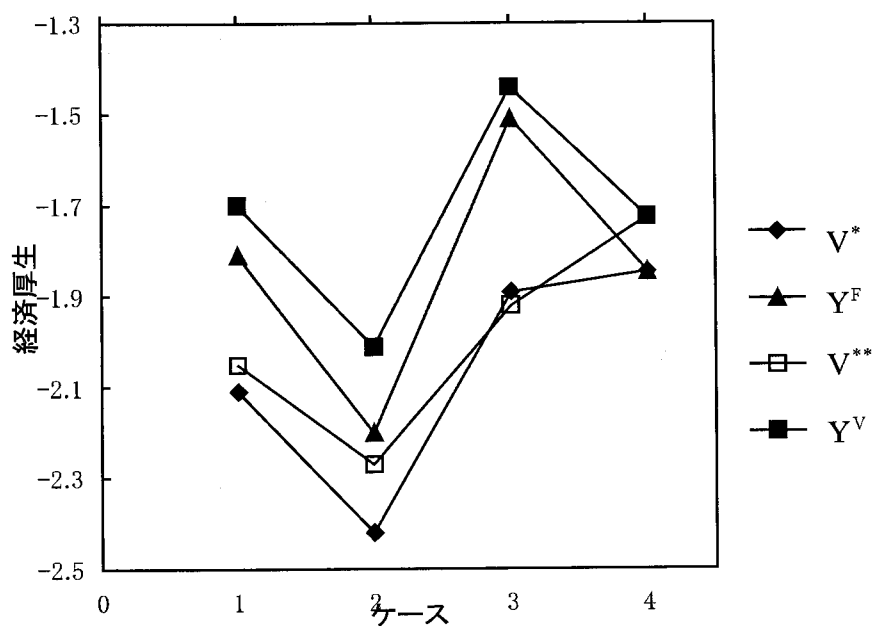


図8-1 情報・料金システムの厚生比較(1)  
( $\Delta=10$ の場合)

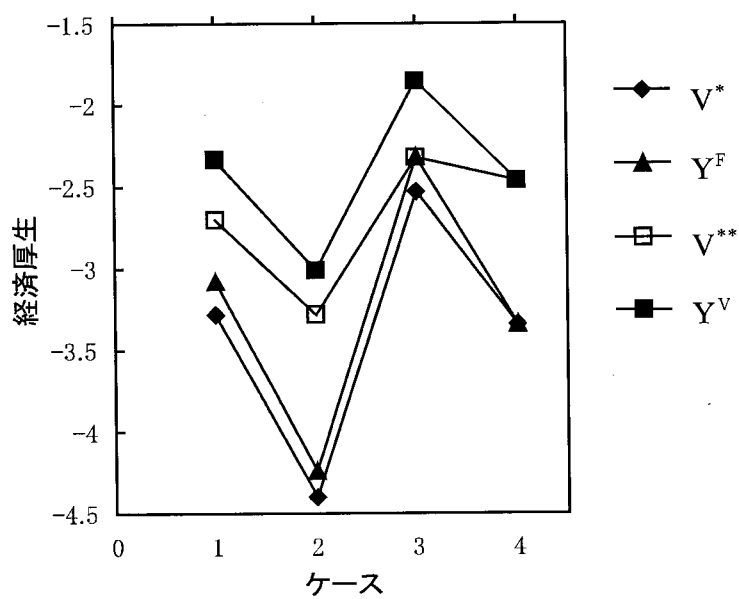


図8-2 情報・料金システムの厚生比較(2)  
( $\Delta=20$ の場合)

図8-2は、 $\Delta=20$ 、すなわち交通容量の分散が大きくなった場合について同様の計算を行った結果を示している。このとき、全般的に情報提供の効果が大きくなることがわかる。

## 8-7 おわりに

本章では、道路の交通状況が変動するという不確実性が存在する場合に、交通情報の提供と料金政策の組み合わせが交通量配分の効率性や、利用者の経済厚生に与える影響を分析した。具体的には、以下の4通りの政策のもとでの交通量配分を求めた。

- [1] 交通情報なし、料金も徴収しない
- [2] 交通情報を提供、料金は徴収しない
- [3] 交通情報なし、料金は状況にかかわらず固定
- [4] 交通情報を提供、料金は状況に応じて変動

[1]と[2]のもとでの社会的厚生を比較することにより、交通情報システム導入の効果を評価することができる。その結果、交通情報のみでは混雑緩和の効果は十分でなく、逆に厚生損失をもたらす可能性があることが示された。[4]のもとでの社会的厚生を他の場合と比較すると、情報提供と料金の徴収を組み合わせることにより、交通量配分の効率性が必ず改善されることが示された。また、[1]と[3]、[2]と[4]の比較により料金政策の効果を分析すると、同じ情報構造のもとでは料金政策が必ず社会的厚生を改善することも示された。

Verhoef, Emmerink, Nijkamp and Rietveld (1996)は、本研究と同様の問題意識で書かれた論文である<sup>3</sup>。そこでは上の4通りの政策に加え、次のような政策の効果も分析している。

- [5] 交通情報を提供するが、料金は状況にかかわらず固定。

その結果、[5]の方式のもとでは[4]とまったく等しい水準の経済厚生を達成することが示された。すなわち、交通情報が提供されれば、道路料金を状況ごと

---

<sup>3</sup> 本章は、文(1995)に基づいており、Verhoef他(1996)とは独立になされた研究である。

に変動させる必要はない。このことは、より単純な料金システムで目標とする成果を達成できることを意味するので、交通管理者にとって有益な結果である。利用者にとっても意思決定の際に考慮すべき変数が少なくなるので受け入れやすいであろう。

ここで得られた結果は、いくつかの仮定に基づいた単純なモデルによって導出されたものである。したがって、これらの結果の一般性を検証するとともに、実用的な情報・料金システムの設計に役立てるため、今後さらに研究を発展させる必要がある。たとえば以下のような研究課題が考えられる。

(1)本研究では、一組のO-D間を直結する道路から成る最も単純なネットワークを想定していた。このような設定のもとではリンク交通量と経路交通量を区別する必要がないので、問題はきわめて単純な構造を持っていた。実際のネットワークを対象に、本稿と同様の分析が行えるよう、モデルの拡張を行う必要がある。特に実際のネットワークを対象とする場合、リンクごとに課される料金がO-Dペア、あるいは経路ごとに一意であるかどうか明らかではない。一意でない場合、各トリップの属性に応じて料金を差別化する必要があるので、料金の徴収はきわめて困難となる。したがって、この問題の検討は情報・料金システムの実現可能性に決定的な影響を及ぼすものと思われる。

(2)本研究では、外生的に与えられた不確実性のみを取りあげている。実際には、利用者の行動そのものが不確実性の原因になっている。たとえば本章の分析では総トリップ数を定数として与えているが、この総トリップ数の変動は、交通状況に大きな影響を与える。総トリップ数は個々の利用者がその日にトリップを行うかどうか意志決定を行った結果として決まる変数なので、本来は内生変数として取り扱うべきものである。

(3)本研究では、情報が提供される場合、その情報が完全なものであると仮定していた。この仮定は単純化のためばかりではなく、情報システム開発の究極の目標が達成された状況という、一つの参照点を求める意義もあった。しかし実際には、完全な情報システムなど存在せず、提供される情報は不確実性の程度を（各事象の生じる確率分布のシフトを通じて）減少させるに過ぎない。このとき設定される料金も不完全なものとならざるを得ない。このような不完備な情報下での混雑料金の設定問題にアプローチする際、小林(1990)による合理

的期待均衡モデルが有益な枠組みを与えている。

(4)交通状況は刻々と変化するが、これに対してリアルタイムの交通制御を行うためには、混雑料金もリアルタイムに変化させる必要がある。この点は、渋滞の対策を検討する際、特に重要な意味を持つ。渋滞は動的な現象であり、本章のような静的モデルで分析することはできない。本書の第2章で議論したように、動学モデルを用いて最適な混雑料金を導出することは理論的に可能であるが、そのような料金の算定には現在の交通状況ばかりでなく後の時刻の交通状況に関する情報をも必要となる。これは、現時点の利用者の経路選択が将来の利用者の経路選択に影響を及ぼすという、動学的外部効果が存在するためである。このような場合、情報システムは交通状況の予測まで行わねばならない。各時点の交通状況に関する情報は、さらなる情報処理技術の進歩によって精度を向上させることが可能と思われるが、予測的情報を求めるにはこれとは別な技術が必要である。予測的情報をいかに求めるか、あるいは不完全な予測的情報にもとづいて求めた料金が、果たして渋滞緩和に有効であるかどうか、など検討すべき課題は実に多い。

#### 付論： 厚生水準の比較

##### (3) $Y^V \geq Y^F$ の証明

(8-14) の最適条件を満たす道路別交通量  $q_i^{koo}$ ，目的関数の最大値を

$T_k^{oo} = \sum_i q_i^{koo} U(c_i^k(q_i^{koo}))$  と表わそう。変動料金と固定料金の下で達成可能な期待効

用の総和を比較する。 $q_i^{koo}$  が式(8-13a)の目的関数を最大にすることより、

$Y^V = \sum_k \pi_k T_k^{oo} \geq \sum_k \pi_k T_k^o = Y^F$  が成立する。ここに、 $T_k^o = \sum_i q_i^o U(c_i^k(q_i^o))$  である。

(4)  $Y^F \geq V^*$ ，(5)  $Y^V \geq V^{**}$  も同様に示すことができる。

##### (6) $V^F < V^*$ の証明

均衡条件(8-4a)(8-4b)の左辺と最適条件(8-9a)(8-9b)の左辺を比較する。

$U' < 0, c' > 0$  より任意の  $q_i \in [0, N]$  に対して必ず  $E[U'c'] < 0$  が成立する。したがって



任意の  $q_i \in [0, N]$  に対して (8-4) の左辺は (8-9) の左辺より大きい値を持つ。

$\sum_i q_i = N$  が 2 つの問題に共通なので、 $V^F < V^*$  が成立する。同様に、(7)  $V^V < V^{**}$  が成

立することも示すことができる。

## 第9章 大阪都市圏のネットワークを対象としたケーススタディ\*

### 9-1 はじめに

第7章では、一組のODが複数のリンクによって直結されるという最も単純なネットワークを対象として、次善の料金の効果を分析した。このような単純な空間設定は、問題のメカニズムを分析するために有益なものであったが、実際の都市の問題に対して具体的な知見を与えるには不十分である。特に実際の都市における交通は二次元の道路ネットワーク上を流れ、混雑の状況もネットワークの結節構造によって異なるものとなる。そして道路利用者は各リンクの混雑状況を考慮して経路を選択する。本章では、以上のような状況を記述するモデルを大阪都市圏の道路ネットワークに適用し、次善の混雑料金政策の効果に関する定量的分析を行う。

ネットワークにおける交通量配分に関する応用研究には膨大な蓄積があるが、次善の料金政策に関する分析が行われるようになったのは、比較的最近のことである。May, Milne (2000) は、英国ケンブリッジ市のネットワークを対象としてコードン、距離比例制、時間比例制、システム最適を計算し、それらの比較を行った。コードン方式については、料金も料金徴収地点も与件であり、これは「次善」とはいえない。Santos, Newbery, Rojey (2001)は、英国の8都市でコードンプライシングの効果を計算した。そこでは料金について最適化しているが、コードンの位置は固定していた。Verhoef (2002)はより一般的な問題を想定し、ネットワーク中の課金すべきリンクと料金水準の最適な組み合わせを求める問題を定式化し、小規模の例題ネットワークを対象にアルゴリズムの検討を行った。Zhang and Yang (2004)はネットワークにおける最適なコードンプライシング・システムを設計する問題を、最も厳密に定式化しその解法を提示している。すなわちコードンラインを横切るリンクの集合を内生的に求められるようにしている。そしてこの手法を上海のネットワークに適用し、コードンプラ

---

\* 本章は Akiyama, Mun, Okushima (2004)に基づいている。その論文の初稿に対し、John McDonald 氏より有益なコメントをいただいた。

イシングの厚生効果を計算している。

ネットワークにおける次善の料金システムに関するこれまでの研究の関心はコードンプライシングに集中している。コードンプライシングは実際に導入された実績もあり、実現性の高い方式であることが大きな理由である。しかしこれ以外にも代替的システムがないわけではない。日本の大都市においては、たとえば東京の首都高速道路、大阪の阪神高速道路などのように、都市高速道路が存在し、都市内交通のかなりの割合を分担している。

本研究では、このような都市高速道路における料金を調節して都市圏全体の交通混雑を制御する可能性に着目する。現在、都市高速道路の料金は均一料金制を採用しているが、この方式は交通混雑の制御を目的として採用したものではなく、料金徴収のコストを抑えるためであった。現在、ETC（料金自動収受システム）の導入が進められており、このシステムが十分に普及すれば、混雑の水準に応じて、よりきめ細かに料金を設定するシステムを採用することが可能である。

高速道路における混雑料金は、上述のコードンプライシングに比べ、下記のような長所がある。第一には、社会的受容可能性は高いということである。コードンプライシングでは、それまで無料であった道路において新たに料金を徴収することになるが、高速道路における混雑料金は、すでに徴収されている料金の水準を変更するのみである。後者の方が、はるかに利用者の抵抗が少ないであろう。さらに後者は、利用者に無料の選択肢を残しておくことになるので、その点でも受け入れやすい方式である。ロンドンでの経験からも明らかのように、コードンプライシングの導入までには、長年にわたる議論と説得のための努力を必要とする。日本では、混雑料金導入に関する議論が十分成熟しているとはいえず、第1段階として高速道路における料金システムの変更から着手することは有望である。第二の長所は、コストが低いということである。コードンプライシングは、コードンを横切るすべての道路に検知装置を設置する必要があるが、高速道路における料金徴収方式の変更は、高速道路の出入り口のみである。現在整備中のETCがその機能を果たすのなら、追加的費用はかなり小さくなるだろう。

本章では、交通ネットワーク均衡モデルを用いて、代替的な次善料金である

コードンプライシングと高速道路における混雑料金の効果を比較・分析する。そのため、9-2 ではモデルについて説明し、9-3 では次善最適の料金を求める問題を定式化する。9-4 では大阪都市圏を対象としたケーススタディの結果について示すことにする。

## 9-2 モデル

都市空間は  $I$  個の離散的なゾーンに区分されており、それぞれのゾーン中心ノードから交通需要の発生、集中がなされるものと仮定する。都市内の道路ネットワークはゾーン中心を含むノードとそれらを結ぶリンクから構成されており、ゾーン間の交通はネットワークに沿って流れる。ネットワークには  $L$  本のリンクがあり、リンク  $a$  を流れる交通量を  $x_a$  と表す。交通需要は弾力的であり、ゾーン  $r$  から  $s$  へのトリップ数を  $Q_{rs}$  とすると、逆需要関数が  $D_{rs}^{-1}(Q_{rs})$  のように与えられる。ゾーン  $rs$  間には複数の経路が存在し、トリップの費用は経路上の走行時間費用と道路料金の和（一般化費用）に等しいと仮定する。すなわち

$$c_{rs}^j = \alpha t_{rs}^j + \tau_{rs}^j \quad (9-1)$$

ここに  $t_{rs}^j$  と  $\tau_{rs}^j$  は、それぞれ、 $rs$  間の  $j$  番目の経路を選んだ場合の所要時間と道路料金、そして  $\alpha$  は時間価値である。上式の右辺第 1 項は走行時間費用、第 2 項は道路料金であるが、いずれも選んだ経路（どのリンクを使って行くか）によって異なる。 $t_{rs}^j$  は経路上の各リンクの通過所要時間の和であるが、各リンクの通過所要時間はそのリンクを通る交通量の増加関数  $t_a(x_a)$  であると仮定する（以下これをリンク走行時間関数と呼ぶ）。したがって

$$t_{rs}^j = \sum_{a \in R_{rs}^j} \delta_{ars}^j t_a(x_a) \quad (9-2)$$

$$\tau_{rs}^j = \sum_{a \in R_{rs}^j} \delta_{ars}^j \tau_a \quad (9-3)$$

$$x_a = \sum_r \sum_s \sum_j \delta_{ars}^j q_{rs}^j \quad (9-4)$$

ここに  $q_{rs}^j$  は OD ペア  $rs$  間の  $j$  番目経路を選択したトリップの数、 $\delta_{ars}^j$  はリンク  $a$  が OD ペア  $rs$  間の  $j$  番目経路上にある場合 1、それ以外は 0 の値をとる変数で

ある。また  $\tau_a$  はリンク  $a$  に関する通行料金である。 $R_{rs}^j$  は  $rs$  間の  $j$  番目経路上にあるリンクの集合である。 $\tau_a$  は料金政策によって異なるが、すべてのリンクについて正の値を持つわけではなく、実際にはむしろゼロの値が与えられるリンクの方が多い。

いま OD トリップ数  $Q_{rs}$  が与えられたものとする。各ドライバーは費用が最小となる経路を選択する。交通ネットワーク均衡は、どのドライバーも選択した経路を変更するインセンティブを持たないような状態が実現したとき達成される。このとき各 OD について、使われている経路のどれを選んでもトリップ費用はすべて等しい値となり、使われない経路の費用はその等しくなった費用より大きい。このことは、 $A_{rs}$  を OD ペア  $rs$  間で利用可能な経路の集合と定義すれば、すべての  $j \in A_{rs}$  について次の条件が成り立つことを意味する。

$$q_{rs}^j > 0 \quad \Rightarrow \quad c_{rs}^j = C_{rs}^*$$

$$q_{rs}^j = 0 \quad \Rightarrow \quad c_{rs}^j \geq C_{rs}^*$$

上の条件は、下記のように形式的に書き表される。

$$c_{rs}^j - C_{rs}^* \geq 0 \quad (9-5a)$$

$$q_{rs}^j (c_{rs}^j - C_{rs}^*) = 0 \quad (9-5b)$$

$$q_{rs}^j \geq 0 \quad (9-6)$$

また定義により次が成り立つ。

$$Q_{rs} = \sum_{j \in A_{rs}} q_{rs}^j \quad (9-7)$$

上式より、OD ペア  $rs$  間のトリップに要する費用は（どの経路を選ぼうが） $C_{rs}^*$  に等しくなる。各個人は、トリップを行うことによる私的便益（支払い意思額）がトリップ費用を上回る限りトリップを行うが、均衡においては、次の関係が成り立つように  $rs$  間の総 OD トリップ数  $Q_{rs}$  が決まる。

$$D_{rs}^{-1}(Q_{rs}) = C_{rs}^* \quad (8)$$

要するに、弾力的交通需要のもとでの交通ネットワーク均衡は、(9-5)-(9-8)を同時に満たすリンク交通量、経路交通量、OD 交通量、均衡交通費用の組である。なお経路交通量は一意に決まらないが、リンク交通量が一意に決まればそれは問題にならない。リンク交通量からゾーン間走行費用も一意に求まり、それによって交通流の状態と厚生を評価するための十分な情報が与えられたことにな

る。

本研究ではベンチマークとして無料金均衡、すなわちどのリンクにまったく料金が徴収されないケースを考える。これは(9-3)式において $\tau_a=0, \text{ for all } a$ 、と書ける。

一方、社会的に効率的な道路利用は、次に示すような社会的余剰最大化問題を解くことによって求められる。

$$\text{Max}_{q_{rs}^j} \sum_r \sum_s \int_0^{Q_{rs}} D_{rs}^{-1}(z) dz - w \sum_a t_a(x_a) x_a \quad (9-9)$$

subject to (9-6)(9-7)

最適化の1階条件より、次の関係が導かれる。

$$D_{rs}^{-1}(Q_{rs}) - w \sum_a \delta_{ars}^j \{t_a(x_a) + t_a'(x_a) x_a\} \leq 0 \quad (9-10a)$$

$$\left[ D_{rs}^{-1}(Q_{rs}) - w \sum_a \delta_{ars}^j \{t_a(x_a) + t_a'(x_a) x_a\} \right] q_{rs}^j = 0 \quad (9-10b)$$

この条件を利用者均衡条件(9-5)-(9-8)と対応させると、各リンクにおける料金が

$$\tau_a = \alpha t_a'(x_a) x_a \quad (9-11)$$

のように設定されるとき、上の最適条件が分権的な利用者均衡のもとで実現することがわかる。すなわち社会的に効率的な道路利用を達成するためには、ネットワークのすべてのリンクにおいて、混雑の外部効果に等しい料金を課する必要がある。このような料金を実行することは困難なので、実際には一部のリンクでのみ料金を徴収するシステムを採用せざるを得ない。

### 9-3 次善の料金政策

#### 9-3-1 一般的定式化

道路管理者は、料金徴収に伴う技術的、社会的制約のもとで、社会的余剰を最大化するよう、料金水準を定めるものとする。ここで考える次善の料金体系とは、ネットワークの一部のリンクでのみ料金が徴収可能であるという状況のもとで、それらのリンクで料金水準を最適に設定することである。なお料金が徴収されるリンクの集合は与えられるものとする。

上の定義に従えば、次善の料金体系は形式的には次の問題を解くことにより求められる。

$$\text{Max}_{\tau} \sum_r \sum_s \int_0^{Q_{rs}(\tau)} D_{rs}^{-1}(z) dz - w \sum_{a \in A} t_a(x_a(\tau)) x_a(\tau) \quad (9-12)$$

$$\text{subject to } \tau_a \geq 0, \text{ for } a \in H, \quad (9-13a)$$

$$\tau_a = 0, \text{ for } a \notin H \quad (9-13b)$$

ここに  $\tau = (\tau_1, \tau_2, \dots, \tau_L)$  であり、 $H$  は課金するリンクの集合（ただし  $H \subset A$ ）である。また  $Q_{rs}(\tau)$ 、 $x_a(\tau)$  は、 $\tau$  のもとで利用者均衡条件(9-5)-(9-8)を解くことにより得られる。 $H$  に含まれるリンク以外では(9-13b)のような制約が課せられているので、上の問題の解はシステム最適よりも劣る次善の解となるのである。もし  $H = A$  であれば、上の問題の解はシステム最適と一致する。本研究では代替的な次善料金方式として、単一コードンプライシング、多重コードンプライシング、そして高速道路におけるゾーン料金制を取り上げる。以下ではそれぞれの方式に対応する  $H$  を特定化する。

### 9-3-2 単一のコードンプライシング

単一のコードンプライシングでは、都市の中心部を取り囲むコードンを横切るすべてのリンクが課金されるリンク集合  $H$  の要素となり、それらのリンクではすべて同額  $\bar{\tau}^C$  の料金が課される。したがって解くべき問題は次のように表される。

$$\text{Max}_{\bar{\tau}^C} \sum_r \sum_s \int_0^{Q_{rs}(\tau)} D_{rs}^{-1}(z) dz - w \sum_{a \in A} t_a(x_a(\tau)) x_a(\tau) \quad (9-14)$$

$$\text{subject to } \tau_a = \bar{\tau}^C, \text{ for } a \in H, \quad (9-15a)$$

$$\tau_a = 0, \text{ for } a \notin H \quad (9-15b)$$

### 9-3-3 多重コードンプライシング

$M$  本のコードンラインが設定され、都市の中心部に近いものから  $1, 2, \dots, M$  のように番号が付けられているものとする。課金されるリンクの集合  $H$  は、 $M$  個の部分集合  $h_m, m = 1, 2, \dots, M$  に分けられ、それぞれは  $m$  番目のコードンラインを横切るリンクの集合に対応する。そして  $h_m$  に含まれるすべてのリンクでは同額の料

金  $\bar{\tau}^C$  が適用される。多重コードンプライシングの場合は、上の問題(9-14)における制御変数  $\bar{\tau}^C$  が  $\bar{\tau}^C$  へと  $M$  次元になり、制約条件が下記のように置き換わる。

$$\tau_a = \bar{\tau}^C, \quad \text{for } a \in h_m, \quad \bigcup_{m=1}^M h_m = H \quad (9-16a)$$

$$\tau_a = 0, \quad \text{for } a \notin H \quad (9-16b)$$

#### 9-3-4 都市高速道路における均一料金

この方式は現行の方式とほぼ同じものである。現行では 700 円の均一料金を高速道路の入り口で徴収しているが、この水準は、高速道路ネットワーク全体について建設費用と維持管理費用の合計が料金収入と均衡するよう設定されたものである。したがって現行の料金に混雑制御を意図したものではない。ここでは(9-14)式の目的関数を最大化するような均一料金水準を探索する。そしてそのような料金と現行料金のもとでの混雑水準を比較することにより、現行料金の混雑制御効果を評価する。本研究で用いるネットワークには、高速道路のオンランプが一つのリンクとして含まれている。従ってこの場合、問題は(9-14)(9-15)と同様の形式になるが、 $H$  はオンランプリンクの集合になる。

#### 9-3-5 高速道路におけるゾーン料金制

高速道路のネットワークを少数の領域に分割し、それぞれの領域を「料金ゾーン」と呼ぶ。そして料金ゾーン  $m$  に属する高速道路リンクを利用した場合に、 $\bar{\tau}_m^H$  に等しい料金が課される。そのような料金は、自動車が料金ゾーン  $m$  に属するオンランプから高速道路に入ったとき、あるいは高速道路上で料金ゾーン境界を横切るリンクを通過したときに課される。したがってこの問題の制約条件は、形式的には(9-16)と同様であるが、 $h_m$  は料金ゾーン  $m$  に属する高速道路リンクの集合として定義される。

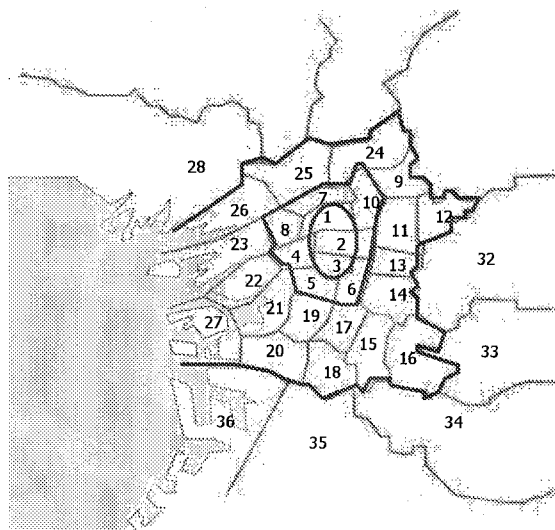
### 9-4 大阪都市圏における実証分析

#### 9-4-1 ゾーン区分とネットワーク

本研究では、大阪市内の 27 区とその周辺の市町村を集約した 9 個のゾーン

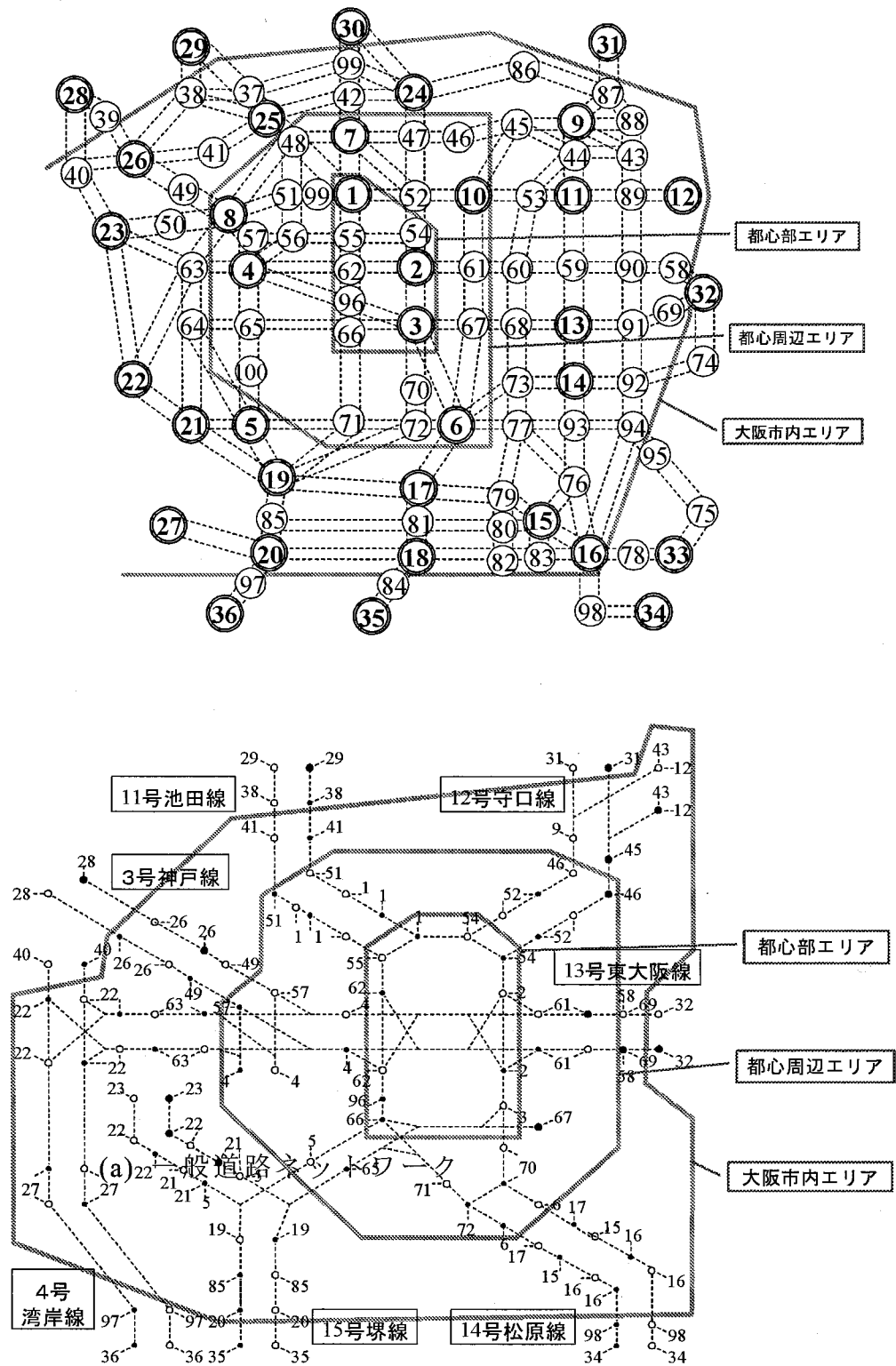


の合計 36 ゾーンを対象とする。道路ネットワークは、阪神高速道路と一般道路を合わせて、241 ノード・630 リンクから成る。これらの詳細については、図 9-1 と図 9-2 に示している。またこれらの図には、後の分析で取り上げられるコーダンの位置を太線で示している。



1 北区	19 西成区
2 中央区(旧東区)	20 住之江本区
3 中央区(旧南区)	21 大正区
4 西区	22 港区
5 浪速区	23 此花区
6 天王寺区	24 東淀川区
7 北区(旧大淀区)	25 淀川区
8 福島区	26 西淀川区
9 旭区	27 住之江南港
10 都島区	28 尼崎市以西
11 城東区	29 豊中市以西
12 鶴見区	30 吹田市以東
13 東成区	31 摂津・守口・門真市以東
14 生野区	32 東大阪・大東市以東
15 東住吉区	33 八尾市以東
16 平野区	34 松原市以東
17 阿倍野区	35 堺市内陸以南
18 住吉区	36 堺市臨海以南

図 9-1 対象地域とゾーン区分



(b) 高速道路ネットワーク

図 9-2 計算に用いるネットワークとコードンの設定

#### 9-4-2 リンク走行時間関数とトリップ需要関数

各リンクの走行時間関数を次のように特定化する。

$$t_a(x_a) = t_a^0 \left\{ 1 + \nu \left( \frac{x_a}{W_a} \right)^\gamma \right\} \quad (9-17)$$

ここに  $t_a^0$  は自由走行状態でリンク  $a$  を通過するのに要する時間、 $W_a$  はリンク  $a$  の交通容量である。ここでは土木学会の交通需要予測小委員会が標準的な値として提案している、 $\nu=0.48$ ,  $\gamma=2.82$  を用いることとする。

需要関数は次式のように特定化する。

$$D_{rs}(C_{rs}) = d \cdot n_r \cdot n_s^{\theta_s} \cdot \exp(-e \cdot C_{rs}) \quad (9-18)$$

ここに  $n_r, n_s$  は、それぞれ発ゾーン  $r$  および着ゾーン  $s$  における昼間人口である。 $d, e, \theta_s$  はパラメータである。

上のような需要関数はしばしば交通量予測に適用される重力モデルと同じ形であるが、第6章で示したように、個人の効用最大化行動から得られた需要関数を集計することにより導出することができる。逆需要関数は次式のようになる。

$$D_{rs}^{-1}(Q_{rs}) = -\frac{1}{e} \log \left( \frac{Q_{rs}}{d \cdot n_r \cdot n_s^{\theta_s}} \right)$$

需要関数のパラメータ値は、観測値と適合するよう推定する。大阪都市圏における OD 交通量の観測値は 1994 年の全国道路交通センサスデータから得た。また時間費用と金銭的費用の和であるトリップ費用のデータは、以下のように作成した。

$$C_{rs} = \sum_{a \in A_{rs}^*} \{ \alpha t_a(\tilde{x}_a) + \tilde{\tau}_a \}$$

ここに  $\tilde{x}_a, \tilde{\tau}_a$  は現状におけるリンク交通量の観測値と現行の道路料金（阪神高速道路）、 $A_{rs}^*$  は現状のリンク交通量と料金のもとで  $rs$  間の（時間単位の）トリップ費用が最小となる経路に含まれるリンクの集合である。なお時間価値  $\alpha$  は 60 円／分・台を仮定する<sup>1</sup>。

<sup>1</sup> この値は阪神高速道路公団節約時間便益計算で用いられた値（80 円／分）よりは低い

需要関数のパラメータ推定結果は次の通りである。

$$d = 0.000024 \quad (15.0503)$$

$$\theta_s = 0.6055 \quad (10.2505)$$

$$e = -0.00074 \quad (-24.8606)$$

$$R^2 = 0.5430$$

なお係数推定値の右側括弧内の数値は t-値を示している。

### 9-4-3 無料金均衡とシステム最適

大阪都市圏における昼間人口とネットワークの条件、そして上のように求めたパラメータをモデルに与えて、無料金均衡とシステム最適について計算した結果を表 9-1 に示す。

表 9-1 無料金均衡とシステム最適に関する計算結果

		無料金	システム最適	現行料金
総トリップ数	(台)	2,352,145	1,919,533	2,244,128
総走行距離	(台・キロ)	22,381,331	16,555,751	20,778,071
総走行時間	(台・時間)	1,183,696	677,124	1,039,374
平均トリップ長	(キロ)	9.52	8.62	9.26
平均旅行時間	(分)	30.2	21.2	27.8
平均料金支払額	(円)	0	672	151
消費者余剰変化	(100万円)		-696	-71
混雑料金収入	(100万円)	0	1,291	338
混雑料金による厚生改善	(100万円)		595	267

システム最適は、各リンクにおいて混雑外部効果に等しい料金を徴収することによって達成されるが、そのとき消費者余剰は無料金時に比べて減少する。しかしその減少分を上回る料金収入を上げることができるため、社会的余剰は増加する。そのような厚生改善は、総トリップ数を 18.4%削減することにより達成される。また平均トリップ長が減少することにも注目されたい。トリップ長が長いほど、その途上で他の道路利用者に混雑の外部効果を及ぼすが、それが

が、他の章で用いられた値（2000 円／時＝33.3 円／分）よりは高い。他の章では個人単

内部化されない無料金均衡のもとではトリップ距離が過大となるのである。平均トリップ時間は 29.8% 減少しているが、これと同じ率で速度上昇したことを意味しない。速度変化を求めるにはトリップ長の変化を考慮して補正する必要がある。すなわち無料金均衡時の平均速度は  $9.52\text{km}/30.2\text{分}=18.9\text{km}/\text{時}$ 、システム最適時は  $8.62\text{km}/21.2\text{分}=24.4\text{km}/\text{時}$  なので、平均速度は 29.1% 上昇したことになる。また「平均料金支払額」は 1 トリップあたりの料金額であるが、8.62km のトリップについて 672 円支払うことを意味する (1km あたり 77.9 円)。システム最適に比べると、無料金均衡における社会的余剰の値は 5 億 9500 万円少ないが、この値は交通混雑による一日あたりの損失額とみなすことができる。すなわち混雑外部性が内部化されて効率的な道路利用がなされていれば達成されていた状況に比べ、無料金均衡ではその額だけ社会的に資源が浪費されていると考えることができる。またこの額は政策によって改善可能な便益の最大値といえるので、次善の政策によって、どの程度までこれに近づけることができるか、というのが評価の基準となる。

以下で次善の料金政策の効果を評価する際には、次のように定義される指標、「相対的改善」を用いることにする。

$$\text{相対的改善} = \frac{SS^{**} - SS^{*}}{SS^{o} - SS^{*}}$$

ここに  $SS^{*}$ ,  $SS^{o}$ ,  $SS^{**}$  は、それぞれ、無料金、社会的最適、次善の料金のもとでの社会的余剰である。分子は次善の料金による厚生改善、分母はシステム最適により達成される厚生改善を表しているので、この指標は最大限可能な厚生改善に対する次善料金の達成度を表しており、1 に近いほど次善料金がより有効であることを意味する。

表には、現行の料金 (700 円の均一料金) に対する計算結果も示している。現行の料金のもとでは、無料金に比べて社会的余剰の値が 2 億 6700 万円だけ大きい。上の定義により相対的改善を計算すると、社会的最適の 44% に達する。現行の均一料金が混雑緩和に果たす役割は小さくない。

---

位で定義されているが、本章では車両単位で定義されているためである。

#### 9-4-4 コードンプライシング

図 9-1、9-2 に示すように、内側から都心部コードン、都心周辺部コードン、大阪市全域コードンという 3 通りのコードンを設定したが、まずはこれらの内一つのみで料金が徴収されるという、単一コードン料金制について検討する。前節の問題(9-14)(9-15)のように、社会的余剰を最大化するよう、それぞれの単一コードンにおいて徴収する料金額を求める。これは一次元の最適化である。また実際の適用を考慮すると料金額を厳密に 1 円単位で求めることは現実的ではないので、100 円単位で料金額を変化させて利用者均衡を計算し、それらの内社会的余剰の最大となる料金額を探索することにした。大阪市全域コードンの場合、料金額と社会的余剰の関係は図 9-3 のようになり、次善最適な料金は 700 円である。

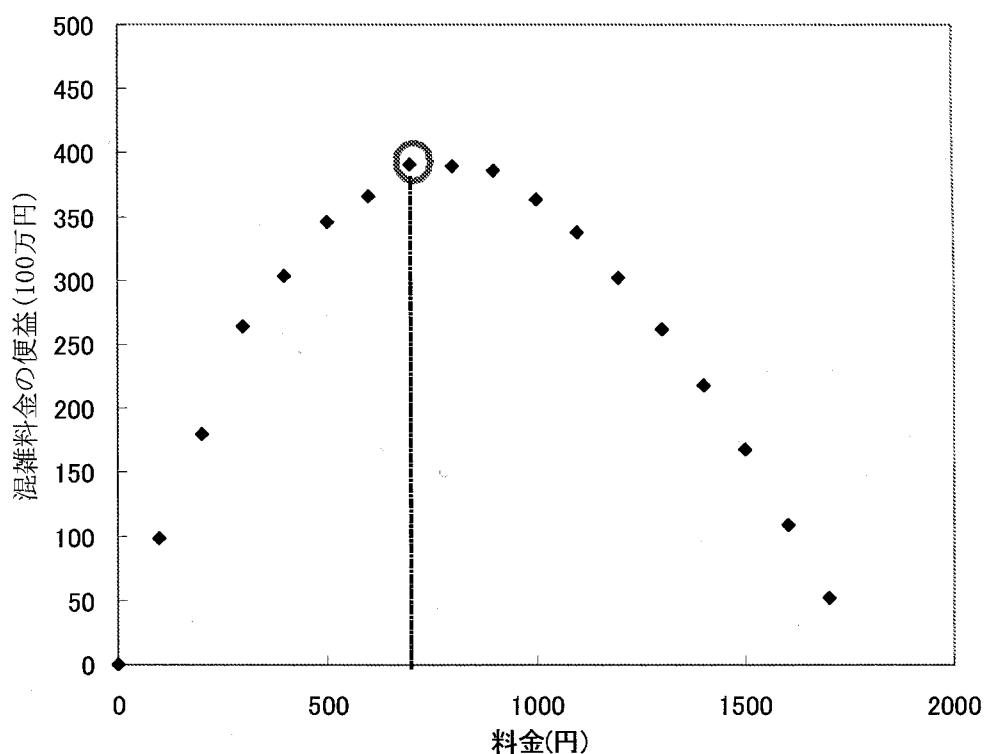


図 9-3 大阪市全域コードンにおける最適な料金

都心コードン、都心周辺部コードン料金制を実施した場合も同様にして最適な

料金を求めた。それらの結果は表 9-2 にまとめられている。都心コードンで料金を徴収する場合の最適料金は 300 円、都心周辺部の場合は 500 円である。社会的余剰は大阪市全域を囲むコードンの場合が最大であり、相対的改善は 65.5%である。

次に多重コードンの場合について検討する。上記の 3 通りのコードンで料金を徴収する場合の料金の最適な組み合わせを求める。それぞれのコードンにおいて 0-2000 円の間で料金水準を 100 円単位で動かすと、組み合わせの数は  $20^3 = 8000$  通りである。この程度の数なら不可能な数ではないので、総当りで計算を実行した。社会的余剰の高いものから順位付けし、上位の組み合わせに関する結果を表 9-4 にまとめている。表によると、上位の組み合わせ間で便益の差は小さく、料金についてもかなり似通っている。最も内側の都心部コードンで 100-200 円、都心周辺コードンで 100-200 円、そして大阪市全域コードンで 500-700 円となっている。大阪市外から都心部に入るため 3 つのコードンを通過すると、合計で 900-1000 円の料金を支払わねばならない。表の最下段に示した、相対的改善の値を見ると、システム最適に対して 77%の厚生改善効果が達成できる。

表 9-2 三通りの単一コードンに関する結果の概要

		無料金	都心コードン	都心周辺コードン	大阪市全域コードン
最適コードン料金	(円)		300	500	700
総トリップ数	(台)	2,352,145	2,202,034	2,070,364	2,068,861
総走行距離	(台・キロ)	22,381,331	20,461,383	18,678,035	17,877,502
総走行時間	(台・時間)	1,183,696	1,043,001	913,443	809,984
平均トリップ長	(キロ)	9.5	9.29	9.02	9
平均旅行時間	(分)	30.2	28.4	26.5	23
平均料金支払額	(円)	0	148	276	367
消費者余剰変化	(100万円)		-160	-314	-369
混雑料金収入	(100万円)	0	325	571	760
混雑料金による厚生改善 (100万円)			165	258	390
相対的改善			27.74%	43.26%	65.58%

表 9-3 3重コードンのもとで上位の料金案に関する結果

	1	2	3	4
都心コードンにおける料金 (円)	200	100	200	200
都心周辺コードンにおける料金 (円)	200	200	200	100
大阪市全域コードンにおける料金(円)	600	600	500	600
総トリップ数 (台)	1,876,692	1,925,830	1,916,118	1,936,784
総走行距離 (台・キロ)	15,624,439	16,223,493	16,194,679	16,344,811
総走行時間 (台・時間)	677,818	712,530	717,560	721,810
平均トリップ長 (キロ)	8.33	8.42	8.45	8.44
平均旅行時間 (分)	21.7	22.2	22.5	22.4
平均料金支払額 (円)	552	511	510	499
消費者余剰変化 (100万円)	-578	-530	-524	-514
混雑料金収入 (100万円)	1,036	984	977	967
混雑料金による厚生改善 (100万円)	458	454	453	453
相対的改善	76.87%	76.31%	76.11%	76.07%

単一コードンで最も大きな改善効果のある、大阪市全域コードンの結果を、これまで行われてきた、類似の研究事例と比較しよう。まず本研究で得られた結果を要約すると次の通りである。

総トリップ数 13.7%減少

社会的余剰は 390 百万円(14.6%)増加

システム最適に対する相対的改善は 65.6%

Santos 他(2000)は、英国の 8 都市を対象として、本研究とほぼ同様の手法によりコードン料金の効果を分析した。結果は都市によって大きな差があり、最適な料金水準は 0.25-3.5 ポンドと求められた。そしてこのような料金を課した結果、トリップ数は 0.8-8.4%減少、1pcu・km あたり社会的余剰が 0.7-7.3 ペンスであるという結果を示している。社会的余剰に関する結果を比較するため、本研究における社会的余剰の増加分を総走行距離で割り、さらに時間価値<sup>2</sup>で割ることにより、時間単位で km あたり余剰の増加分を求めた。英国の数値は

<sup>2</sup> Santos らは 23.4 ペンス／pcu・分、本研究では 60 円／台・分を仮定している。



0.03-0.31 分であるのに比べ、本研究は 0.36 分であり、英国の 8 都市における最大値よりもさらに大きい。トリップ数の減少率についても同様に、本研究における結果がかなり大きい。

Zhang and Yang (2004)は上海のネットワークを対象として、単一コードンおよび二重コードン料金制に関する分析を行った。彼らはネットワークにおけるコードンラインの位置に関する最適化も行っている。ケーススタディでは朝のラッシュ時を想定してすべてのトリップが都心ノードに吸収されるものとしており、またコードンラインの外側から流入する場合のみ課金を行っている。計算の結果、単一コードンについて最適化した場合に社会的余剰が 0.93%の増加にとどまり、システム最適に対する相対的改善率も 28.3%であった。これは単一中心性を仮定したことを考慮すれば、小さい値といえる。本研究では非単一中心を想定しているにもかかわらず、Zhang and Yang (2004)の結果と比べて、厚生 of 改善効果がかなり大きい。

Sumalee (2004)は英国のエジンバラを対象として、単一コードンの位置と料金の最適な組み合わせを求めている。ここではシステム最適に対する相対的改善率はさらに小さく、20.5%であった。

第 6 章で示したように、料金政策の効果は都市構造、需要の弾力性、ネットワークの整備水準などに大きく依存する。実際、Santos らの研究では、同じ分析手法を用いても料金政策の効果が都市ごとに大きく異なっていることから、本研究における効果が異常に大きいものなのか判断することは困難である。考えられる要因として次の点が指摘できる。

(a)本研究では、コードンを横切る方向にかかわらず一定の額の料金を徴収することになっている。他の研究では、都市の外側から内側に流入する方向のみに料金を課している。

(b)本研究において推定された需要関数は、トリップ費用に関する弾力性が大きい。(9-18)式によれば需要の価格弾力性は  $eC_{rs}$  により求められる。本研究で得られたパラメータ推定値と平均トリップ費用（平均トリップ時間 30.2 分×時間価値 60 円/分）を適用すると、弾力性値は 1.34 となる。この値は他の研究で用いられている値に比べてかなり大きい。しかし最近、Shaffer and Santos(2004)はロンドンの混雑課金の前後で弾力性値を推定したが、その結果、1.32 から 2.1 と

いう高い値を得ているので、本研究で用いた値が異常に高いというほどではない。

#### 9-4-5 高速道路における混雑料金

まずは現行のシステムと同じ高速道路の均一料金制のもとで社会的余剰を最大化するような料金水準を求める。表 9-4 の第 2 列に示すように、最適な料金水準は 900 円であった。このことは現行の料金(700 円)が、混雑を制御するためには過小であることを示唆している。

次に高速道路におけるゾーン料金制については、先に設定した三通りのコードンラインの内一つを料金ゾーン境界とし、内側と外側で異なった額の料金を徴収するという、2 ゾーンシステムについて検討する。ここでは、CBD コードンを境界にするケースをゾーンシステム A、都心周辺コードンを境界にするケースをゾーンシステム B、大阪市全域コードンを境界とする場合をゾーンシステム C と呼ぶ。表 9-4 に示すように、ゾーンシステム C が最も効果的であり、相対的改善の水準は 53.8%に達する。この値は、コードンプライシングにおいて達成される効果（最大で 76.87%）に比べると小さい。この結果は、次のことを考慮すれば妥当と思われる。コードンプライシングでは、高速道路であろうが一般街路であろうが、都市の中心部に流入するすべての車両が課金の対象になるのに対し、高速道路のみで料金を徴収する場合には、課金を回避するような経路選択が可能であるからである。制御の対象となるトリップが少ないと、効果が限定的にならざるを得ない。一方、料金制導入による消費者余剰の変化を見ると、ゾーン料金制による消費者余剰の減少は、コードンプライシングによるものよりもかなり小さい。たとえば表 9-2 における都心周辺コードンのケースと表 9-4 におけるゾーンシステム A のもとで達成する便益は、それぞれ 258 と 292（百万円）で、ほぼ同じ水準である。しかしこれらのケースにおける消費者余剰の減少分は、前者が 314(百万円)であるのに対し後者は 95(百万円)である。すなわちゾーン料金制のもとでは、同じ水準の混雑緩和便益を実現するための消費者余剰の減少は少なく済むのである。

次に、前節で設定した 3 本のコードンラインを料金ゾーンの境界とする、4 ゾーンシステムについて検討する。1 位から 4 位までの料金案に関する結果を、

表 9-5 に示す。いずれも、都心やその周辺のゾーンにおける料金は低く、外縁部に行くほど高くなっている。相対的改善の値は最良案に対して 61.6%であり、2 ゾーンシステムの最良案に対する 53.8%に比べると効果大きい。にもかかわらず消費者余剰の減少は 2 ゾーンシステムよりも小さい。

表 9-4 高速道路における混雑料金(1)－均一料金と 2 ゾーンシステム

		均一料金	ゾーンシステムA	ゾーンシステムB	ゾーンシステムC
均一料金	(円)	900			
内側ゾーンの料金	(円)		600	500	600
外側ゾーンの料金	(円)		200	200	500
総トリップ数	(台)	2,182,796	2,216,391	2,228,534	2,202,561
総走行距離	(台・キロ)	19,816,894	20,232,568	19,771,329	19,243,220
総走行時間	(台・時間)	991,673	1,009,733	991,471	957,026
平均トリップ長	(キロ)	9.08	9.13	8.87	8.74
平均旅行時間	(分)	27.3	27.3	26.7	26.1
平均料金支払額	(円)	185	174	182	213
消費者余剰変化	(100万円)	-128	-95	-102	-149
混雑料金収入	(100万円)	403	386	405	469
混雑料金による厚生改善	(100万円)	275	292	303	321
相対的效果		46.18%	49.00%	50.94%	53.87%

表 9-5 高速道路における混雑料金(2)－4 ゾーンシステムにおける上位料金案

		1	2	3	4
都心部料金圏	(円)	200	100	0	200
都心周辺料金圏	(円)	0	100	100	0
大阪市内料金圏	(円)	400	300	300	300
大阪市外料金圏	(円)	500	500	600	600
総トリップ数	(台)	2,220,761	2,230,874	2,231,359	2,233,407
総走行距離	(台・キロ)	19,036,987	19,243,268	19,188,028	19,208,542
総走行時間	(台・時間)	950,729	961,587	957,930	959,797
平均トリップ長	(キロ)	8.57	8.63	8.60	8.60
平均旅行時間	(分)	25.7	25.9	25.8	25.8
平均料金支払額	(円)	215	209	207	211
消費者余剰変化	(100万円)	-111	-102	-98	-110
料金収入	(100万円)	477	466	461	471
混雑料金による厚生改善	(100万円)	367	364	363	361
相対的改善		61.65%	61.15%	61.08%	60.71%

得られた数値に対するイメージをつかむために、表 9-3、9-4、9-5 における、コードンプライシング、ゾーン料金制のそれぞれの最良案について、無料金の場合と比べた 1 トリップあたり得失を計算すると下記の通りである。なお、無料金の場合の 1 トリップあたり所要時間は 30.2 分である。

	所要時間の変化	消費者余剰の変化
コードンプライシングの最良案	-8.5 分	-308 円
2 ゾーンシステムの最良案	-4.1 分	-68 円
4 ゾーンシステムの最良案	-4.5 分	-50 円

上の数値を見ると、コードンプライシングによる混雑削減効果が大きいこと、そしてゾーン料金制では消費者余剰の減少がかなり小さいことがわかる。2 ゾーンシステムと 4 ゾーンシステムの比較は、より詳細な料金システムを設計すれば、利用者の損失を抑えながらより大きな混雑緩和効果を達成する可能性があることを示唆している。

## 9-5 おわりに

本研究では、ネットワークにおける混雑と交通流動を記述するモデルを大阪都市圏に適用し、次善の料金政策の効果を実証的に分析した。都心部、都心周辺、大阪市全域を囲む3通りのコードン案について最適な料金を求め、社会的余剰の改善効果を評価した。その結果、大阪市全域コードンが最も高い厚生改善効果をもたらすことが示された。また3コードンで同時に料金を徴収する3重コードン制のもとで最適な料金の組み合わせを求めたところ、大阪市外から都心に行くためにすべてのコードンを通過する場合、合計900-1000円の料金を徴収することが最適であることが示された。またそのとき、システム最適による厚生改善の77%もの効果を達成する。

一方、高速道路におけるゾーン料金制のもとでは、コードンプライシングに比べると厚生改善は小さいが、同じ程度の厚生改善を達成する場合、利用者の余剰減少は小さいことが示された。また、より精緻な料金システムを構築することにより、利用者の損失を抑えつつ、より大きな厚生改善を達成する可能性が示された。

本研究で検討した高速道路料金システムはまだ単純なものであり、より複雑なシステムを考案する余地は大きい。たとえば、ゾーン数を増やす、路線別に料金を設定する、さらにはオンランプとオフランプの組み合わせに対して差別的な料金を設定する、などが考えられる。そのためには、膨大な数に達する料金の組み合わせの中から効率的に最適解を見つけるための計算手法の開発が必要である。一方、複雑な料金システムに対して、各利用者が合理的な選択を行うためには、様々な経路選択肢に対して所要時間と料金額に関する情報を提供するシステムの存在が不可欠である。そしてほとんどの車両でそのシステムが利用可能にならないと、複雑な料金システムの受容は困難だと思われる。そのための技術的基盤はすでに実用段階にあるといえるが、各車両に搭載する機器の普及がネックである。それぞれの車の所有者が自らの私的動機で機器の購入を決定するような状況では、機器の普及水準が過小になるものと思われる。このように機器の普及を促進するために公的介入が正当化される場合、様々な政

策手段に関する経済学的分析も今後の研究課題として残されている。

## 参考文献

- Ahn, K., (2005), Road Pricing and Optimal Bus Service Policy, *Master Thesis, Graduate School of Economics, Kyoto University*.
- Akiyama, T., Mun, S., and Okushima, M., (2004), Second-Best Congestion Pricing in Urban Space: Cordon Pricing and Its Alternatives, *Review of Network Economics*, 3, 401-414.
- Anas, A., and Xu, R., (1999), Congestion, land use, and job dispersion: A general equilibrium model, *Journal of Urban Economics*, 45, 451-73.
- Arnott, R., (1994), Introduction to Part IV, in R. Arnott et al. (eds.), *Public economics: Selected papers by William Vickrey*, Cambridge University Press, 271-275.
- Arnott, R., de Palma, A., and Lindsey, R., (1990a), Economics of a bottleneck, *Journal of Urban Economics*, 27, 111-130.
- Arnott, R., de Palma, A., and Lindsey, R., (1990b), Departure time and route choice for the morning commute, *Transportation Research*, 24B, 209-228.
- Arnott, R., de Palma A., and Lindsey R., (1991), Does providing information to drivers reduce traffic congestion?, *Transportation Research*, 25A, 309-318.
- Arnott, R., de Palma, A., and Lindsey, R., (1992), Route choice with heterogeneous drivers and group-specific congestion costs, *Regional Science and Urban Economics*, 22, 71-102.
- Arnott, R., de Palma, A., and Lindsey, R., (1995), Recent developments in the bottleneck model, *Research Paper*, 95(11), University of Alberta.
- Arnott, R., and Yan, A., (2000), The Two-Mode Problem: Second-best Pricing and Capacity, *Review of Urban and Regional Development Studies*, 12, 170-199.
- Arnott, R. and Small, K.A., (1994), The Economics of Traffic Congestion, *American Scientist*, 82, 446-455.
- Beckmann, M. J., C. B. McGuire and C. B. Winston, (1956), *Studies in the Economics of Transportation*, Yale University Press.
- Beckmann, M. J., (1976), Spatial equilibrium in the dispersed city, in

- G.J.Papageorgiou(eds.), *Mathematical Land Use Theory*, Lexington Books, Lexington, Mass, 117-125.
- Beers, T., (2000), Flexible schedules and shift work: replacing the '9-to-5' workday?, *Monthly Labor Review*, 33-40.
- Boyce, D., (1994), Martin J. Beckmann - Robert Herman Lifetime Achievement awarded in Transportation Science, Transportation Science Section, Operations Research Society of America, *Transportation Science*, 28, 177-179.
- Braid, R. M., (1989), Uniform versus Peak-Load Pricing of a Bottleneck with Elastic Demand, *Journal of Urban Economics*, 26, 320-27.
- Braid, R. M., (1996), Peak-Load Pricing of a Transportation Route with an Unpriced Substitute, *Journal of Urban Economics*, 40, 179-97.
- Button,K. J., (1993), *Transport Economics (2<sup>nd</sup>ed.)*, Edward Elgar.
- Wright, C. L., (1992), *Fast Wheels, Slow Traffic: Urban Transport Choices*, Temple University Press.
- Chu, X, (1993), *Comment on Dynamic user equilibrium departure times and route choice on idealized traffic arterials*, Mimeo, University of California, Irvine.
- Chu, X., (1995), Endogenous trip scheduling: The Henderson approach reformulated and compared with the Vickrey approach, *Journal of Urban Economics*, 37, 324-343.
- Dafermos, S. C. and Sparrow, F. T., (1969), The traffic assignment problem for a general network, National Bureau of Standards, *Journal of Research*, 73B, 91-118.
- Daganzo, C. F., (1985), The uniqueness of a time dependent equilibrium distribution of arrivals at a single bottleneck, *Transportation Science*, 19, 29-37.
- Daganzo, C.F. and Sheffi, Y., (1977), On stochastic models of traffic assignment, *Transportation Science*, 11, 253-255.
- de Palma,A., and Lindsey, R., (2002), Road pricing for a monocentric city with a radial network, *Paper for presentation at the 49<sup>th</sup> North American Meetings of the Regional Science Association International*, San Juan, Puerto Rico.
- d'Ouille, E. L. and McDonald, J. F., (1990), Effects of demand uncertainty on optimal capacity and congestion tolls for urban highways, *Journal of Urban*



- Economics*, 28, 63-70.
- Downs, A., (2004), *Still Stuck in Traffic*, Brooking Institution Press.
- Else, P. K. (1981), A reformulation of the theory of optimal congestion taxes, *Journal of Transport Economics and Policy*, 15, 217-232.
- Evans, S. P., (1976), Derivation and analysis of some models for combining trip distribution and assignment, *Transportation Research*, 10, 37-57.
- Evans, A. W., (1992), Road congestion: The diagrammatic analysis, *Journal of Political Economy*, 100, 211-217.
- Fisk, C., (1980), Some developments in equilibrium traffic assignment, *Transportation Research*, 14B, 243-255.
- Fujita, M., (1989), *Urban Economic Theory: Land use and city size*, Cambridge University Press, Cambridge, New York and Melbourne.
- Greenshields, B. D., (1935), A Study in Highway Capacity, *H. R. B. Proceedings*, 14, 468.
- Grossman, S., (1989), *The Informational Role of Prices*, The MIT Press.
- Hatta, T., (1983), Competition and Nationally Optimum Resource Allocation under the Presence of Urban Traffic Congestion, *Journal of Urban Economics*, 14, 145-167.
- Hendrickson, C., and Kocur, G., (1981), Schedule delay and departure time decisions in a deterministic model, *Transportation Science*, 15, 62-77.
- Henderson J. V., (1981), The economics of staggered work hours, *Journal of Urban Economics*, 9, 349-364.
- Henderson, J. V., (1985), *Economic Theory and the Cities*, Academic Press.
- Hills, P., (1993), Road Congestion Pricing: When is it a Good Policy?, *Journal of Transport Economics and Policy*, 27, 91-99.
- Ho, H. W., Wong, S. C., Yang, H. and Loo, B. P. Y., (2003), Cordon-based Congestion Pricing in a Continuum Traffic Equilibrium System, *Presentation at International Conference on the Theory and Practice of Congestion Charging*, London.
- Kanafani, A. and Al-Deek, H., (1991), A simple model for route guidance benefits,

- Transportation Research*, 25B, 191-201.
- Kanemoto, Y., (1980), *Theories of Urban Externalities*, North Holland.
- Kawashima, T., (1988), Optimal congestion tax of expressway: A. A. Walters re-examined, P. K. Else re-appraised and demand-surface paradigm re-considered, *Gakushuin Economic papers*, 25, 47-74.
- Knight, F. H., (1924), Some Fallacies in the Interpretation of Social Cost, *The Quarterly Journal of Economics*, 38(4), 582-606.
- Kraus, M., (1989), The welfare gains from pricing road congestion using automatic vehicle identification and on-vehicle meters, *Journal of Urban Economics*, 25, 261-281.
- Laffont, J.J., (1989), *The Economics of Uncertainty and Information*, The MIT Press.
- LeBlanc, L. J., E. K. Morlok, and W. Pierskalla (1975), An efficient approach to solving the road network equilibrium traffic assignment problem, *Transportation Research*, 9, 309-318.
- Lindsey, C.R. and E.T. Verhoef (2000), Congestion modelling, in D.A. Hensher and K.J. Button (eds.), *Handbook of Transport Modelling*, Handbooks in Transport 1 Elsevier / Pergamon, *Amsterdam*, 353-373.
- Lindsey, C.R. and E.T. Verhoef (2001), Traffic congestion and congestion pricing, in D.A. Hensher and K.J. Button (eds.), *Handbook of Transport Systems and Traffic Control*, Handbooks in Transport 3 Elsevier / Pergamon, *Amsterdam*, 77-105.
- Lighthill, M.H. and Whitham, G.B., (1955), On kinematic waves, II: a theory of traffic flow on long crowded roads, *Proceedings of the Royal Society (London)*, A229, 317-345.
- Liu, L.N., and McDonald, J.F., (1999), Economic efficiency of second-best congestion pricing schemes in urban highway systems, *Transportation Research, Part B*, 33, 157-188.
- Mahmassani, H. and Herman, R., (1984), Dynamic user equilibrium departure time and route choice on idealized traffic arterials, *Transportation Science*, 18, 362-384.

- Makigami, Y., Nakanishi, T., and Kim, S., (1984), Simulation model applied to Japanese expressway, *ASCE Journal of Transportation Engineering*, 110, 94-111.
- Marchand, M., (1968), A note on optimal tolls in an imperfect environment, *Econometrica*, 36, 575-581.
- May, A.D., and Milne, D.S., (2000), Effects of alternative road pricing systems on network performance, *Transportation Research, Part A*, 34, 407-436.
- McDonald, J. F., (1989), Econometric studies of urban population density: A survey, *Journal of Urban Economics*, 26, 361-385.
- Mills, E. S. and D. M. DeFerranti, (1971), Market choices and optimum city size, *Papers and Proceedings of the American Economic Review*, 61, 340-345.
- Mohring, H., (1976), *Transportation Economics*, Ballinger.
- Morrison, S. A., (1986), A survey of road pricing, *Transportation Research*, 20A, 87-97.
- Moss, R. L., and Curtis, T. D., (1985), The economics of flextime, *Journal of Behavioral Economics*, 14, 95-114.
- Mun, S., (1994), Traffic jams and the congestion toll, *Transportation Research*, 28B, 365-375.
- Mun, S., (1999), Peak-load pricing of a bottleneck with traffic jam, *Journal of Urban Economics*, 46, 323-349.
- Mun, S., Konishi, K. and Yoshikawa, K., (2003), Optimal cordon pricing, *Journal of Urban Economics*, 54, 21-38.
- Mun, S., Konishi, K., and Yoshikawa, K., (2005), Optimal Cordon Pricing in a Non-Monocentric City, *Transportation Research, Part A*, 39, 723-736.
- Mun, S., and Yonekawa, M., (1999), Flex Time, Traffic Congestion, and Urban Productivity, *Paper for presentation at the 46-th North American Meetings of Regional Science Association, Montreal*.
- Mun, S., and Yonekawa, M., (2005), The Effects of Flex Time on Traffic Patterns with Bottleneck Congestion, in Kobayashi, K., Lakshmanan, T.R., Anderson, W. P. (eds.), *Structural Change in Transportation and Communications in the Knowledge Society*, Edward Elgar.

- Newell, G. F., (1988), Traffic flow for the morning commute, *Transportation Science*, 22, 47-58.
- Ogawa, H., and Fujita, M., (1980), Equilibrium land use patterns in a non-monocentric city, *Journal of Regional Science*, 20, 455-475.
- Parry, I. W. H., (2002), Comparing the Efficiency of Alternative Policies for Reducing Traffic Congestion, *Journal of Public Economics*, 85(3), 333-362.
- Pigou, A. C., (1920), *The Economics of Welfare*, Macmillian & Co. London.
- Richardson. H. W. and Bae, C. H. C., (1998), The equity impacts of road congestion pricing, in: K.J. Button, E.T. Verhoef (Eds.), *Road Pricing, Traffic Congestion and the Environment: Issues of Efficiency and Social Feasibility*, Edward Elgar, Cheltenham, U.K, 247-262.
- Sandholm, W. H., (2002), Evolutionary Implementation and Congestion Pricing, *Review of Economic Studies*, 69, 667-89.
- Santos, G., Newbery, D., Rojey, L., (2001), Static vs. Demand Sensitive Models and the Estimation of Efficient Cordon Tolls: An Exercise for Eight English Towns, *Transportation Research Record* 1747, 44-50.
- Seila, A. F., and Wilson, P. W., (1991), Deadweight loss in highway toll collection, *Transportation Research*, 25B, 127-141.
- Shaffer, B. and G. Santos (2004) Preliminary Results of the London Congestion Charging Scheme, Presented at the 83rd Annual Meeting of the Transportation Research Board, Washington DC, January 11-15, 2004.
- Sheffi, Y., (1985), Urban Transportation Networks, *Prentice-Hall*, New York.
- Shepard, E. M., Clifton, T. J., and Kruse, D., (1996), Flexible Work Hours and Productivity: Some Evidence from the Pharmaceutical Industry, *Industrial Relations*, 35, 123-39.
- Small, K.A., (1982), The scheduling of consumer activities: Work trips, *American Economic Review*, 72, 467-479.
- Small, K. A., (1983), The incidence of congestion tolls on urban highways, *Journal of Urban Economics*, 13, 90-111.
- Small, K.A., (1992), Urban Transportation Economics, *Harwood Academic*

*Publishers.*

- Small, K.A., and Yan, Jia, (2001), The Value of "Value Pricing" of Roads: Second-Best Pricing and Product Differentiation, *Journal of Urban Economics*, 49, 310-336.
- Small, K.A., and Gomez-Ibañez, J.A.,(1998), Road pricing for congestion management: The transition from theory to policy, in: K.J. Button, E.T. Verhoef (Ed.), *Road Pricing, Traffic Congestion and the Environment: Issues of Efficiency and Social Feasibility*, Edward Elgar, Cheltenham, 213-246, U.K.
- Small, K.A., and Chu, X., (2003), Hypercongestion, *Journal of Transport Economics and Policy*, 37(3), 319-52.
- Smith, M.J., (1979), The marginal cost taxation of a transportation network, *Transportation Research*, 13B, 237-242.
- Solow, R., and Vickrey, W., (1971), Land use in a long narrow city, *Journal of Economic Theory*, 3, 430-447.
- Sullivan, A.M., (1983a), The general equilibrium effects of congestion externalities, *Journal of Urban Economics*, 14, 80-104.
- Sullivan, A.M., (1983b), Second-best policies for congestion externalities, *Journal of Urban Economics*, 14, 105-123.
- Sumalee, A., (2004), Optimal Road User Charging Cordon Design: A Heuristic Optimization Approach, *Journal of Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering*, 19, 377-392.
- Tomiyama, K., (1985), Two-stage optimal control problems and optimality conditions, *Journal of Economic Dynamics and Control*, 9, 317-337.
- Tong, C. O. and Wong, S. C., (1997), The advantages of a high density, mixed land use, linear urban development, *Transportation*, 24, 295-307.
- Verhoef, E.T. (2001) An integrated dynamic model of road traffic congestion based on simple car-following theory: exploring hypercongestion, *Journal of Urban Economics* 49 505-542.
- Verhoef, E.T., (2002), Second-best congestion pricing in general networks: heuristic algorithms for finding second-best optimal toll levels and toll points,

- Transportation Research*, Part B, 36, 707-729.
- Verhoef, E.T., (2003), Inside the Queue, Hyper congestion and Road Pricing in a Continuous Time-Continuous Place Model of Traffic Congestion, *Journal of Urban Economics*, 54(3), 531-65.
- Verhoef, E.T., R.H.M. Emmerink, P. Nijkamp and P. Rietveld (1996), Information Provision, Flat and Fine Congestion Tolling and the Efficiency of Road Usage, *Regional Science and Urban Economics*, 26(5), 505-29.
- Verhoef, E.T., Nijkamp, P., and Rietveld, P., (1996), Second-best congestion pricing: The case of an untolled alternative, *Journal of Urban Economics*, 40, 279-302.
- Verhoef, E.T. and Small, K. A., (2004), Product Differentiation on Roads: Constrained Congestion Pricing with Heterogeneous Users,; *Journal of Transport Economics and Policy*, 38(1), 127-156.
- Vickrey, W. S., (1963), Pricing in urban and suburban transport, *American Economic Review*, 53, 452-465.
- Vickrey, W. S., (1969), Congestion theory and transport investment, *American Economic Review*, 59, 251-261.
- Walters, A.A., (1961), The theory and measurement of private and social cost of highway congestion, *Econometrica*, 29, 676-699.
- Wardrop, J. G., (1952) Some theoretical aspects of road traffic research, *Proceedings of the Institute of Civil Engineers*, Part II, 325-378.
- Wheaton, W.C., (1978), Price-induced distortions in urban highway investment, *Bell Journal of Economics*, 9, 622-632.
- Wilson, P. W., (1988), Wage variation resulting from staggered work hours, *Journal of Urban Economics*, 24, 9-26.
- Zhang, X., and Yang, H., (2004), The Optimal Cordon-Based Network Congestion Pricing Problem, *Transportation Research, Part B, Methodological*, 38(6), 517-537.
- 赤松隆・桑原雅夫, (1988), 確率利用者均衡条件下での最適混雑料金, 土木学会論文集, 389, 121-129.
- 飯田恭敬編, (1992), 「交通工学」, 国民科学社, 260-261.

- 飯田恭敬・内田敬, (1993), リスク対応行動を考慮した道路網経路配分, 土木学会論文集, 464, 63-72.
- 太田勝敏(1997) 利用者便益の推定、中村英夫(編)、「道路投資の社会経済評価」、第6章、101-122、東洋経済新報社。
- 奥村誠・永野光三, (1997), 時差出勤施策が通勤者の厚生に及ぼす影響, 第11回応用地域学会研究発表大会.
- 奥村誠・小林潔司・田中成興 (1999) 鉄道時差通勤の社会的便益と導入インセンティブに関する分析、応用地域学研究 第4号、63-76。
- 金本良嗣,(1997), 「都市経済学」, 東洋経済新報社.
- 清野一治・金本良嗣, (1989), 交通料金, 奥野正寛・篠原総一・金本良嗣編「交通政策の経済学」, 27-47.
- 桑原雅夫, (1998), 道路交通における出発時刻選択に関する研究解説, 土木学会論文集, No.604, 73-84.
- 桑原雅夫 (2002), 動的な限界費用に関する理論的分析、土木学会論文集, No.709、127-138.
- 交通工学会編, (1984), 「交通工学ハンドブック」, 技報堂出版.
- 越正毅, (1998), 道路混雑対策としての時差出勤と混雑課金の効果についての一考察, 交通工学, 33(3).
- 小林潔司, (1990), 不完備情報下における交通均衡に関する研究, 土木計画学研究・論文集, 8, 81-88.
- 小林潔司・文 世一・多々納裕一, (1995), 交通情報による経路誘導システムの経済便益評価に関する研究, 土木学会論文集, 506, 77-86.
- 坂下 昇・林山泰久, (1993), 混雑料金導入による混雑緩和効果に関する研究, 高速道路と自動車、第36巻第10号.
- 坂下 昇, (1994), 交通超混雑の経済理論, 交通学研究, 1993 年研究年報, 121-138.
- 佐々木公明・文 世一. (2000), 「都市経済学の基礎」有斐閣。
- 佐藤輝明・松本昌二・佐野可寸志, (1996), フレックスタイム制導入による時間帯別通勤交通の変化とその効果, 土木計画学研究・講演集, 19(2), 833-836.
- 竹内健蔵, (1999), 最適な混雑料金水準設定に関する政策上の問題点, 高速道路

- と自動車、第42巻、第3号、18-25.
- 土木学会, (1998), 交通ネットワークの均衡分析ー最新の理論と解法ー, 土木学会.
- 土木学会, (2003), 道路交通需要予測の理論と適用, 土木学会.
- 西井和夫, (1988), 高速道路におけるチェックポイント通過料金決定方法, 土木計画学研究・論文集, 6, 259-256.
- 日本交通政策研究会, (1988), 時間価値の理論とその計測手法の研究, 日交研シリーズ A-123.
- 八田達夫, (1995), 東京の過密通勤対策, 八田達夫・八代尚宏編「東京問題の経済学」, 東京大学出版会, 59-90
- 卷上安爾・中西恒彦・久間木信夫・金世一, (1983), 高速道路の単路部渋滞モデルについて, 交通工学, 18, 3-16.
- 松井寛・藤田素弘, (1993), フレックスタイム下における通勤時刻選択行動とその効果分析, 土木学会論文集, 470/IV-20, 67-76.
- 松澤俊雄, (1992), 道路混雑と混雑税の再考察, 高速道路と自動車, 35(8), 19-28.
- 松川勇, (2003), 「ピークロード料金の経済分析」, 日本評論社.
- 室町泰徳, (1999), 「交通需要マネジメント」, 都市計画, 1999, vol.48, No.5, 25-28.
- 文 世一, (1993a), 超混雑の経済学的分析に関する一考察, 高速道路と自動車, 36(9), 16-22.
- 文 世一 (1993b), 混雑料金と交通量配分, 土木計画学研究・論文集, 11, 113-120.
- 文 世一 (1995) ロードプライシングと交通情報、土木計画学ワンデーセミナー・シリーズ第7回、「交通情報システムをとりまく諸問題」、58-64、土木学会。
- 文 世一・米川 誠 (1999)、フレックスタイムが交通混雑に及ぼす影響、日交研シリーズ A-260、日本交通政策研究会。
- 文 世一・小林潔司・安野貴人, (1997), 価格情報による経路誘導に関する理論的研究, 土木学会論文集, 562, 57-67.
- 文 世一 (2001) 交通渋滞の動的分析、山田浩之編「交通混雑の経済分析」第



10 章、勁草書房.

梁瀬和裕・古池弘隆, (1990), フレックスタイム制による通勤交通の変化, 土木計画学研究・講演集, 13, 585-590

山内弘隆・竹内健蔵, (1992), 混雑税理論の展望－経済学の視点, 土木学会論文集, 449, 17-26.

山田浩之(編), 2001, 「交通混雑の経済分析」, 勁草書房.

労働省, (1999), 「賃金労働時間制度等総合調査報告」, 労務行政研究所.